



LUND UNIVERSITY

Resursslöseri i anläggningsbyggandet?

Vad kan vi lära av 50 års utveckling?

Björnsson, Ivar; Kamrad, Thomas; Lundstedt, Karl; Thelandersson, Sven; Lövquist, Anders; Gustafsson, Stefan

2025

Document Version:
Förlagets slutgiltiga version

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Björnsson, I., Kamrad, T., Lundstedt, K., Thelandersson, S., Lövquist, A., & Gustafsson, S. (2025). *Resursslöseri i anläggningsbyggandet? Vad kan vi lära av 50 års utveckling?* (TVBK; Nr 3080). Div. of Structural Engineering, Lund University.

Total number of authors:
6

General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00

Resursslöseri i anläggningsbyggandet?

Vad kan vi lära av 50 års utveckling?

Ivar Björnsson, Avd. Konstruktionsteknik, LTH

Thomas Kamrad, Centerlöp och Holmberg

Karl Lundstedt, Skanska

Sven Thelandersson, Avd. Konstruktionsteknik, LTH

Anders Lövquist, Sweco

Stefan Gustafsson, Sweco



Report TVBK-3080

ISBN 978-91-87993-28-2

ISBN (digital version) 978-91-87993-29-9

Lunds universitet, Lunds Tekniska Högskola (LTH)

Avdelning för Konstruktionsteknik

P.O. Box 118

221 00 LUND, Sweden

2025

Förord

Denna rapport sammanfattar arbetet och resultaten från ett forskningsprojekt lett av Lunds Universitet (avd. Konstruktionsteknik, Lund Tekniska Högskola) i samarbete med industripartners i Sverige (Skanska, Centerlöf & Holmberg, Sweco och Trafikverket). Innehållet har arbetats fram av denna arbetsgrupp men med stor hjälp av ett antal andra personer.

Idén till projektet kommer ursprungligen från Sweco som skapade en blogg 2020 där man med konkreta exempel visade att materialvolymerna i byggnadsverk har ökat kraftigt över tid.

Vi vill börja med att tacka alla som gett oss värdefulla synpunkter och kommentarer. Detta inkluderar vår referensgrupp, alla som deltog i intervjustudien och de som deltog i vår industriworkshop i Lund, nov. 2024. Synpunkter från Trafikverket under resans gång har även varit av stor hjälp och där vill vi särskilt tacka Johan Lagerkvist, Karl-Magnus Krona, och Kurt Palmqvist för era kritiska men konstruktiva kommentarer. En del personer har även direkt bidragit till innehållet i rapporten och med det vill vi tacka Hans-Ola Öhrström från Trafikverket som hjälpte oss med våra undersökningar av plattrambroar och med att få tillgång till mycket värdefulla data i BaTMan systemet. Jakob Tengvall och Carl Turell bidrog med viktiga slutsatser genom deras examensarbete på plattrambroar som handledes av LTH tillsammans med Trafikverket. Håkan Camper från Skanska var även aktiv tidigt i projektet med insiktsfulla bidrag.

Ivar Björnsson och Sven Thelandersson

Lund, Februari 2025

Sammanfattning

Anläggningssektorn står inför en stor utmaning de närmaste decennierna för att klara av de hållbarhetsmål som samhället ställer och mildra konsekvenserna av pågående klimatförändringar. Med denna rapport vill vi medverka till detta genom att fokusera på branschens möjligheter att bidra till hållbarhet genom reduktion av materialförbrukning/klimatavtryck vid planering och uppförande av nya byggnadsverk.

En genomgång av hur materialåtgången ändrats de senaste 50 åren presenteras och visar en tydlig ökning över tid för betongbroar byggda i Sverige. Undersökningar av enskilda fall visar att en rad olika faktorer kan bidra till detta, men en generell slutsats är att ändringar i regelverk och projekteringsarbete har haft en stor påverkan. Trafiklasterna har ökat samtidigt som att t.ex. beständighetskrav skärpts betydligt. Det finns ett starkt behov av att utvärdera om sådana ändringar är reellt motiverade och för att undersöka detta krävs ett systematiskt arbete med att dokumentera kvaliteten hos existerande konstruktioner.

Att våra regelverk innehåller betydligt flera detaljregler och att dess komplexitet har ökat kraftigt över tid, innebär konsekvenser för projekteringsarbetet. Detta kan ta fokus ifrån det övergripande målet att leverera säkra, välfungerande och materialoptimerade konstruktioner. Vilja att ifrågasätta normerna krävs, vilket innebär att vi behöver ökad förståelse av bakgrunden till normerna och deras säkerhetsformat samt till de olika krav som stipuleras. I detta avseende har akademien ett stort ansvar dels genom att det som lärs ut på universiteten påverkar framtida ingenjörer och dels för att utvecklingar i regelverken ofta har drivits av forskare (utan direkt hänsyn till de praktiska konsekvenser detta har för byggandet).

En övergång till alltmer avancerade konstruktionsberäkningar innebär väsentliga risker för ökade materialvolymmer samtidigt som det kräver mycket mer tid av ingenjören jämfört med om enklare beräkningsmodeller används. En viktig fråga är om och när det extra arbetet är motiverat och kostnadseffektivt. I projektet visar vi att enklare modeller leder till jämförbara resultat med mindre tid och med mindre risk för fel. Sund konceptuell förståelse av verknings sätt är ett krav för att kunna bedöma rimligheten av resultaten från avancerade datorbaserade analyser.

För att ta itu med dessa problem krävs en samlad insats från beställare, konsulter, entreprenörer och akademien. Några förslag till åtgärder är att: främja samverkan mellan beställare och utförare med fokus på helhetsperspektiv och tillitsfull samverkan, skapa en öppen databas med nyckeltal för materialmängder från tidigare projekt, utveckla ett meriteringssystem för konstruktörer för att säkerställa nödvändig kompetens, utmana och förtydliga existerande regelverk för att undvika onödig materialförbrukning, och uppmuntra konceptuellt tänkande hos ingenjörer och ifrågasätta regelverk när det är motiverat.

Vi som ingenjörer har ett ansvar gentemot samhället för att leverera konstruktioner som är säkra, funktionella, kostnadseffektiva och inte minst hållbara. Att enbart fokusera på övergång till grönare materialalternativ räcker inte och mer fokus behövs för att klokt reducera materialvolymerna i byggandet.

Projektet har finansierats av Trafikverket (via branschforskningsprogrammet BBT) samt SBUF. Resultaten i denna rapport återspeglar inte nödvändigtvis finansierarnas åsikter.

Summary in English

The construction sector faces a significant challenge in the coming decades to achieve sustainability goals and mitigate the consequences of ongoing climate change. The aim of this report is to contribute to this aim by highlighting the need for reduced material consumption in the planning and construction of new structures, with specific focus on bridges.

A historical overview of material consumption for these structures is presented with a 50 years perspective; the results indicate a clear trend towards increased material consumption for concrete bridges built in Sweden. In depth investigations of selected case studies indicate that various factors contribute to this rise, but a general conclusion is that developments in design codes and engineering practices have had a significant impact. Traffic loads have increased while durability requirements have become stricter. There is a strong need to evaluate whether these changes are justified, and this requires systematic work to assess and document the quality of existing structures.

The fact that design codes contain significantly more prescriptive provisions, and that their complexity has increased greatly over time, has implications for engineers working in practice. This can lead to a compliance-oriented behavior, where the aim is to fulfill set provisions without critical reflection; thus, diverting focus away from the overall goal of delivering safe, functional, and material-optimized structures. To counterbalance this, it is important for practicing engineers to attain an increased understanding of the codes, their safety format, and the various provisions contained therein. In this regard, academia has great responsibility, partly because what is taught at universities influences future engineers, and partly because developments in the design codes have often been driven by researchers (without direct consideration of the practical consequences this has for practicing engineers).

The transition to increasingly advanced structural modeling and calculation is another factor which has driven increases in material consumption. Compared with simpler structural models, these approaches require a lot more time from the engineers, especially if the aim is to optimize material usage. An important question is whether and when the extra work is justified and cost-effective. In the project, we show that simpler models lead to comparable results with less time and less risk for human error. A sound conceptual understanding of structural analysis and behavior is necessary in order to verify results from advanced computer-based analyses.

Addressing these issues requires a collective effort from infrastructure owners/operators, consultants, contractors, as well as academia. Some suggested mitigating measures include: promoting collaboration between owners/operators, contractors and consultant with a focus on a holistic perspective and trustful cooperation; creating an open database with baseline indicators for suitable material quantities based on selected previous projects; developing a merit system for engineering designers to ensure necessary competence; challenging and clarifying existing code provisions to avoid unnecessary material consumption; and encouraging conceptual thinking among engineers and the courage to question design codes when justified.

As engineers, we have a responsibility to society to deliver structures that are safe, functional, cost-effective, and not least sustainable. Focusing solely on transitioning to greener material alternatives is not enough, and more focus is needed on how to systematically reduce material consumption.

The project has been financed by the Swedish Transport Administration (Trafikverket, strategic program BBT) and the Development Fund of the Swedish Construction Industry (SBUF). The results in this report do not necessarily reflect the opinions of the financiers.

Innehållsförteckning

Förord.....	i
Sammanfattning.....	iii
Summary in English.....	v
1 Introduktion	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte & metod	3
1.3 Begränsningar	3
1.4 Disposition	4
2 Historisk utveckling av materialförbrukning i byggandet	5
2.1 Bakgrund	5
2.2 Materialåtgång över tid - plattrambroar i Sverige det senaste 50 åren	7
2.3 Möjliga orsaker – en studie av fyra olika jämförelseobjekt.....	10
2.3.1 Bakgrund	10
2.3.2 Järnvägsbroar över Höje å	10
2.3.3 Järnvägsbroar i Ängelholm.....	11
2.3.4 Vägbro E4, Ljungby.....	12
2.3.5 Transportkulvertar Malmö allmänna sjukhus.....	14
2.4 Tillståndsbedömning av broar över tid	15
2.4.1 Bakgrund	15
2.4.2 Plattrambroars tillstånd över tid.....	16
2.4.3 Jämförelseobjektens tillstånd	17
2.5 Sammanfattning.....	17
3 Förändring av regelverk och normer under 50 år.....	19
3.1 Bakgrund	19
3.2 Lastförutsättningar föreskrivna i regelverk.....	19
3.2.1 Trafiklast på vägbroar	20
3.2.2 Trafiklast på järnvägsbroar	21
3.3 Skärpta krav på betongkonstruktioner	22
3.3.1 Krav på sprickbegränsning.....	22
3.3.2 Krav på minimiarmering	23

3.3.3	Krav på täcksikt.....	23
3.3.4	Sammanfattning.....	24
4	Förändringar av projekteringsarbetet under 50 år.....	27
4.1	Allmänt.....	27
4.2	Ökad omfattning av detaljregler och ökad komplexitet.....	28
4.3	Ökad användning av datorbaserade analyser – konsekvenser.....	32
4.3.1	Konsekvenser av modelleringsbeslut vid beräkning av en plattrambro.....	32
5	Aspekter på byggprocessen	35
5.1	Bakgrund	35
5.2	Plan- och byggprocessen	36
5.2.1	Tidiga skeden.....	36
5.2.2	Projekterings- och byggnationsskede	39
5.3	Kortade byggtider leder till ökad materialförbrukning.....	42
6	Förslag till framtida åtgärder	43
6.1	Generella åtgärder	43
6.2	Åtgärder kopplade till regelverk som styr projekteringen av byggnadsverk.....	43
6.3	Åtgärder från beställare.....	44
6.4	Åtgärder från teknik konsulter.....	45
6.5	Åtgärder från entreprenörer.....	45
6.6	Åtgärder från aktörer inom forskning och utbildning.....	46
7	Sammanfattning och slutsatser	49
8	Referenser.....	53
Bilaga A	Fallstudier.....	57
Bilaga B	Historik, normer och lastökningar	73
Bilaga C	2D vs 3D modellering	83
Bilaga D	Tidiga skeden i väg- och järnvägsprojekt	87
Bilaga E	Industriworkshop	89
Bilaga F	Intervjuundersökning.....	91

1 Introduktion

1.1 Bakgrund

Byggindustrin står inför en stor utmaning för att uppnå hållbarhetsmålen under de kommande decennierna. I Trafikverkets senaste miljörapport anges att *byggande, drift och underhåll* står för ca 1,3 miljoner ton CO₂ekv/år, eller ca 87% av det totala växthusgasutsläppet från Trafikverkets egen och upphandlade verksamhet (Litborn et al. 2024). I samma rapport beskrivs skärpta klimatmål för infrastrukturen där utsläppen ska minska med 60% till 2030 och med 80% till 2035 (år 2040 ska infrastrukturen vara klimatneutral).

Enligt Trafikverket kommer den största delen av utsläppen för byggandet, drift och underhåll från diesel, asfalt, samt betong och stål. En vidare uppdelning på exempelvis byggnadsverk är oklar men enligt uppgifter från Trafikverket kan i ett enskilt projekt utsläppen för bro ligga på ca 20% av de totala utsläppen. För att uppnå Trafikverkets miljömål krävs därför en samlad insats från alla aktörer med koppling till anläggningskonstruktioner, inklusive konstruktörer, entreprenörer, beställare/förvaltare, materialleverantörer, samt akademien som utbildar framtida ingenjörer och driver forskning. I detta sammanhang är beslut som fattas under hela projekterings-, bygg-, och förvaltningsprocessen avgörande för att uppnå optimala och hållbara lösningar.

Det finns många initiativ inom byggsektorn för att minimera klimatavtryck från byggnadsverk. Till exempel arbetar materialtillverkare mot att leverera byggmaterial med minskade koldioxidavtryck. Fossilfri produktion av stål samt utveckling av betong med reducerat cementinnehåll är två framträdande exempel. Dessa utvecklingar speglar hållbarhetsmedvetna val av byggmaterial med fokus på hur de negativa effekterna av materialproduktion och leverans kan minskas. Men den lägsta hängande frukten är att genom sund ingenjörskonst minimera den totala mängden material som används när vi konstruerar och utför nya byggnadsverk.

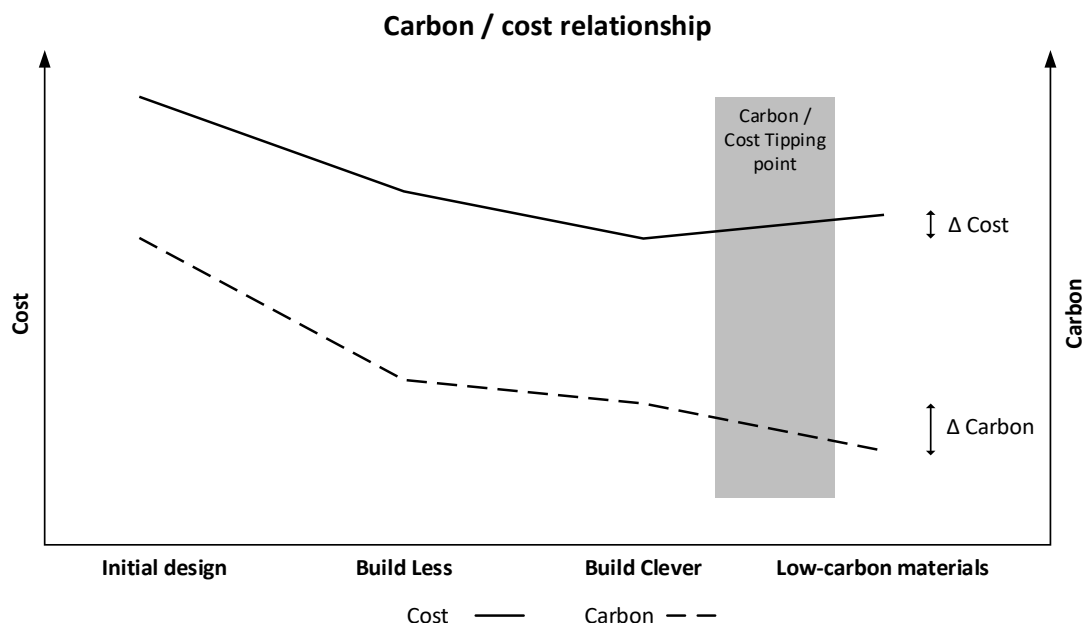
Det finns en tydlig korrelation mellan mängden inbyggt material, byggkostnad och miljöbelastning. Om man väljer att utreda, analysera och minimera materialåtgången sker följande:

- Det går åt mindre material, vilket sänker inköpskostnad och transportarbete.
- En mindre mängd material kräver färre arbetstimmar vilket minskar arbetskostnaden och byggtiden.
- Byggkostnaden minskar ytterligare genom att påslag för vinst och ersättning för tillägsarbeten regleras med procentpåslag vilket ytterligare minskar byggkostnaden.
- Hantering och transporter minskar med minskad inbyggd mängd.

För att reducera såväl kostnad som klimatavtryck bör därför klimatreducerande åtgärder i form av materialbesparing ges högre prioritet. Man bör främst sträva efter att bygga mindre väg, järnväg och byggnadsverk, vilket bör övervägas i tidiga planeringsskeden. I intervjuer med erfarna experter (Bilaga F) förmedlas exempel där man hade kunnat undvika att bygga flera broar genom mindre justeringar av en järnvägssträckning. Som kommer att visas i denna rapport finns det också stor potential att ytterligare minska materialåtgång genom smartare projektering i byggskedet, vilket också kan ge minskat koldioxidavtryck till reducerad kostnad.

Om man inte minimerar mängderna utan enbart byter traditionella material mot lågutsläppsmaterial kan miljöbelastningen reduceras med risk för kostnadsökning eftersom marknadspriset på dessa alternativ oftast är högre. Slutresultatet blir ändå att miljöbelastningen ökar om man inte minimerar

volymen material. Figur 1.1 hämtad från Sweco, se Barlow & Metaxas (2020), illustrerar detta principiellt. Man har i denna referens infört begreppet *tipping point* när den positiva korrelationen mellan koldioxidavtryck och kostnad upphör att gälla.



Figur 1.1. Principfigur som visar hur klimatåtgärder också ger lägre kostnad till en viss gräns; figuren återskapat efter Barlow & Metaxas (2020).

Denna rapport sammanfattar arbetet och resultaten från ett forskningsprojekt lett av Lunds Universitet (avd. Konstruktionsteknik, Lunds Tekniska Högskola) i samarbete med industripartners i Sverige (Skanska, Centerlöf & Holmberg, Sweco och Trafikverket). Projektet undersöker den historiska utvecklingen av materialförbrukningen i broar och andra anläggningskonstruktioner i Sverige samt vilka faktorer som påverkat detta. Bakgrunden är att man i praktiken har observerat betydande ökningar av materialmängder och därmed klimatavtryck över tid i både enskilda jämförbara byggnadsverk och i tidigare undersökningar på området. Fokus i projektet är materialmängder som använts i nya byggnadsverk inom transportinfrastrukturen. Inom detta område är det lättare att identifiera konstruktioner från olika tidsperioder som i princip har samma funktion och därmed kan jämföras över tid. En hypotes är dock att en liknande utveckling har skett inom husbyggnadsområdet, även om det är svårare att verifiera.

Projektet har finansierats av Trafikverket (via branschforskningsprogrammet BBT) samt SBUF. Resultaten i denna rapport återspeglar inte nödvändigtvis finansierarnas åsikter.

1.2 Syfte & metod

Målet med forskningsprojektet har i huvudsak varit att hjälpa branschen att förverkliga möjligheten att bidra till hållbarhet genom reduktion av materialförbrukning/klimatavtryck för anläggningsbyggnadsverk. För att uppnå detta mål har huvudsyften varit att:

- kartlägga nyckelfaktorer bakom ökad materialförbrukning i brobyggande i ett 50-årigt perspektiv,
- undersöka om dessa faktorer är reellt motiverade, och
- föreslå åtgärdsstrategier för framtiden.

Följande metoder har använts med fokus på dessa syften:

- Analys av data från Trafikverkets förvaltningssystem BaTMan för en vanlig brotyp.
- Detaljerad analys av utvalda enskilda referensobjekt där äldre och nyligen byggda broar jämförs.
- Djupare undersökningar av identifierade faktorer som förändringar av regelverk och normer, ingenjörsarbete samt hur planerings- och byggprocessen kan påverka materialåtgången.
- Intervjustudie med ca 15 erfarna broexperter och specialister.

Arbetsgruppen som har arbetat aktivt i projektet bestod av brokonstruktörer, entreprenörer, beställare samt akademien. Intervjuer gjordes med ett antal erfarna experter inom området, se vidare bilaga F, där intervjufrågor och intervjupersoner beskrivs.

Insamling av synpunkter från andra aktörer inom svenska anläggningsbranschen gjordes vid flera tillfällen när projektet presenterades. En industriworkshop hölls mot slutet av projektet för att samla in ytterligare värdefulla bidrag, särskilt med fokus på det sista och mest kritiska syftet att identifiera åtgärdsstrategier för framtiden.

1.3 Begränsningar

De byggnadsverk som studerats är i huvudsak broar som byggnadsverk i infrastrukturen. En ytterligare begränsning är att enbart betongbroar, som är vanligast i Sverige (se Figur 2.1), har ingått i studien. Broar byggda med andra material har av tidsskäl inte ingått.

Sökning och utvärdering av en större mängd broobjekt i BaTMan begränsades också av resursskäl till överbyggnaden hos plattrambroar, som är en mycket vanlig brotyp.

Vid skrivandet av denna rapport pågår arbete med att införa en andra generation eurokoder. När Eurokoderna refereras är det till den första generationen om inget annat anges.

I projektet har vi identifierat ett antal problem som vi menar behöver åtgärdas. Vi vill tydligt framhålla att vi inte lägger vikt på att identifiera 'vems fel det var', eftersom det tankesättet inte kommer att leda någonstans i slutändan. Vår vision är i stället att alla relevanta aktörer inklusive akademien måste bidra till att åstadkomma en positiv utveckling i framtiden.

Vissa av åtgärderna som vi föreslår i slutet av rapporten är naturligen svåra att implementera. I sådana fall försöker vi ge råd hur dessa kan utvecklas vidare.

1.4 Disposition

Kapitel 2 undersöker historiskt hur materialåtgång i anläggningsbyggandet ökat samt orsaker till ökning. Analyser görs på plattrambroar där data från broförvaltningssystemet BaTMan utvärderats, och ett antal fallstudier presenteras där äldre och nya jämförbara bro(liknande) konstruktioner har analyserats.

Kapitel 3 behandlar förändringar i regelverk och normer sett över tid. Fokus läggs på lastförutsättningar främst för järnvägs- och vägbroar samt på skärpta krav på betongkonstruktioner över tid.

Kapitel 4 beskriver de stora förändringar som skett i ingenjörers arbete och metoder över längre tid och de konsekvenser detta har lett till.

Kapitel 5 beskriver nyckelaspekter på planerings- och byggprocess och de konsekvenser dessa har för möjligheten att åstadkomma hållbarhet.

Kapitel 6 innehåller förslag till framtida åtgärder som viktiga aktörer i branschen kan vidta för att bidra till mer hållbara byggnadsverk i infrastrukturen.

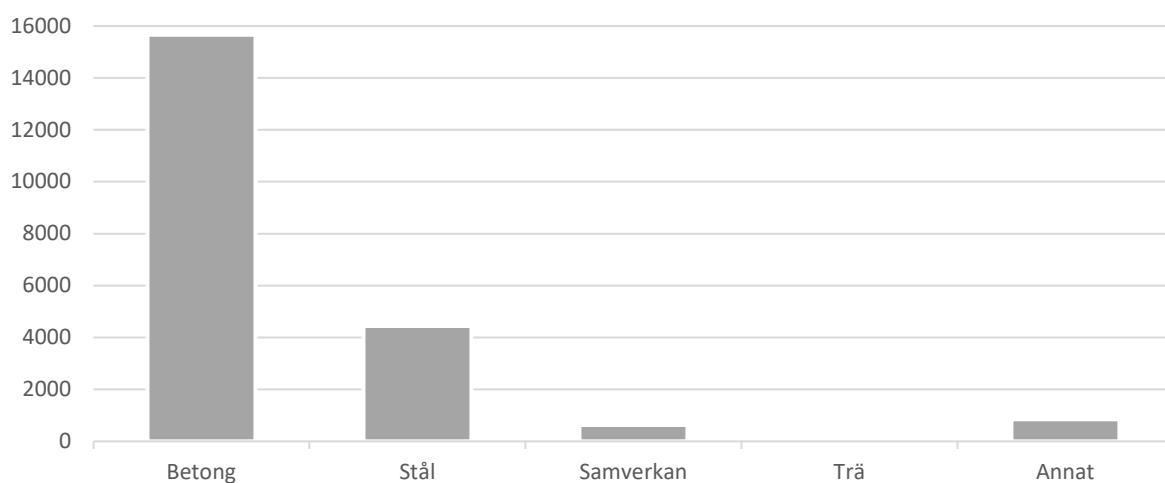
Kapitel 7 beskriver sammanfattning och slutsatser.

Kapitel 8 innehåller referenser.

2 Historisk utveckling av materialförbrukning i byggandet

2.1 Bakgrund

Trafikverket äger och förvaltar närmare 22 tusen broar med cirka 100 nya broar som byggs årligen. Enligt uppgifter från Trafikverket så fördelas antal nybyggda broar under 2019-2023 ungefär så här: rörbroar 34%, plattramar 33%, plattbroar 10%, och övriga 23%. Av broarna som finns registrerade i förvaltningssystemet BaTMan (Bridge and Tunnel Manager) är betong det vanligaste byggmaterialet, se Figur 2.1.



Figur 2.1. En sammanfattning över antal broar registrerade i Trafikverkets digitala förvaltningssystem BaTMan uppdelat på konstruktionsmaterial.

En genomgripande utveckling har skett under det senaste halvsekllet när det gäller hur vi projekterar och bygger i samhället (Addis 1990, Kurrer 2008). Två viktiga exempel är omfattande användning av finita elementmetoden samt utveckling av byggnormer med säkerhetsformat som kalibrerats med probabilistiska metoder, i praktisk tillämpning benämnd som partialkoefficientmetoden. Drivande i utvecklingen har bl.a. varit lärdomar från konstruktioner som rasat eller där något annat signifikant fel har uppstått (Petroski 1985, 1994). Några framstående broexempel är (Björnsson 2015):

- Menai Suspension Bridge rasade 1839 under en storm – vilket hade stor påverkan på hur hängbroar byggdes för att undvika problem med vibrationer.
- Tay Bridge rasade 1879 under en storm – vilket ledde till en signifikant ökning av dimensionerande vindlast.
- Quebec Bridge rasade 1907 under byggtiden – vilket ledde till ny forskning kring instabilitetsfenomen för stålkonstruktioner.
- Tacoma Narrows Bridge rasade 1940 på grund av vindinducerad instabilitet – som ledde till ny forskning kring aeroelastisk instabilitet och etablerade vindtunnel testning som metod.
- London Millennium Bridge stängdes 2000 på grund av stora vibrationer – vilket initierade forskning kring ett nytt vibrationsfenomen *synchronous lateral vibration* som numera hanteras vid dimensionering av gångbroar.

Dessa extrema, och lyckligtvis sällsynta fall, har ofta lett till en ändring i byggnormer i riktning mot nya eller skärpta krav. Regelverken syftar även till att innehålla någon sorts *best practice* som innebär att det ska tillvara tidigare erfarenhet som t.ex. etablerade byggmetoder och lösningar. Oavsett källan till ändringar är det viktigt att belysa den stora påverkan som regelverk har för yrket och de konstruktioner som byggs (Nethercot 2011). Om det sker en ändring är det eftersträvaransvärt att: (1) analysera och utvärdera konsekvenserna för projektering och byggande av konstruktioner och (2) integrera erfarenhet och lärdomar från befintliga konstruktioner som en sorts *reality check*. Att uppnå detta i verkligheten är inte självklart. Vikten av att eftersträva dessa mål är särskilt stor i fall där en ändring har drivits renodlat av akademiker utan direkt hänsyn till praktiska konsekvenser för byggandet.

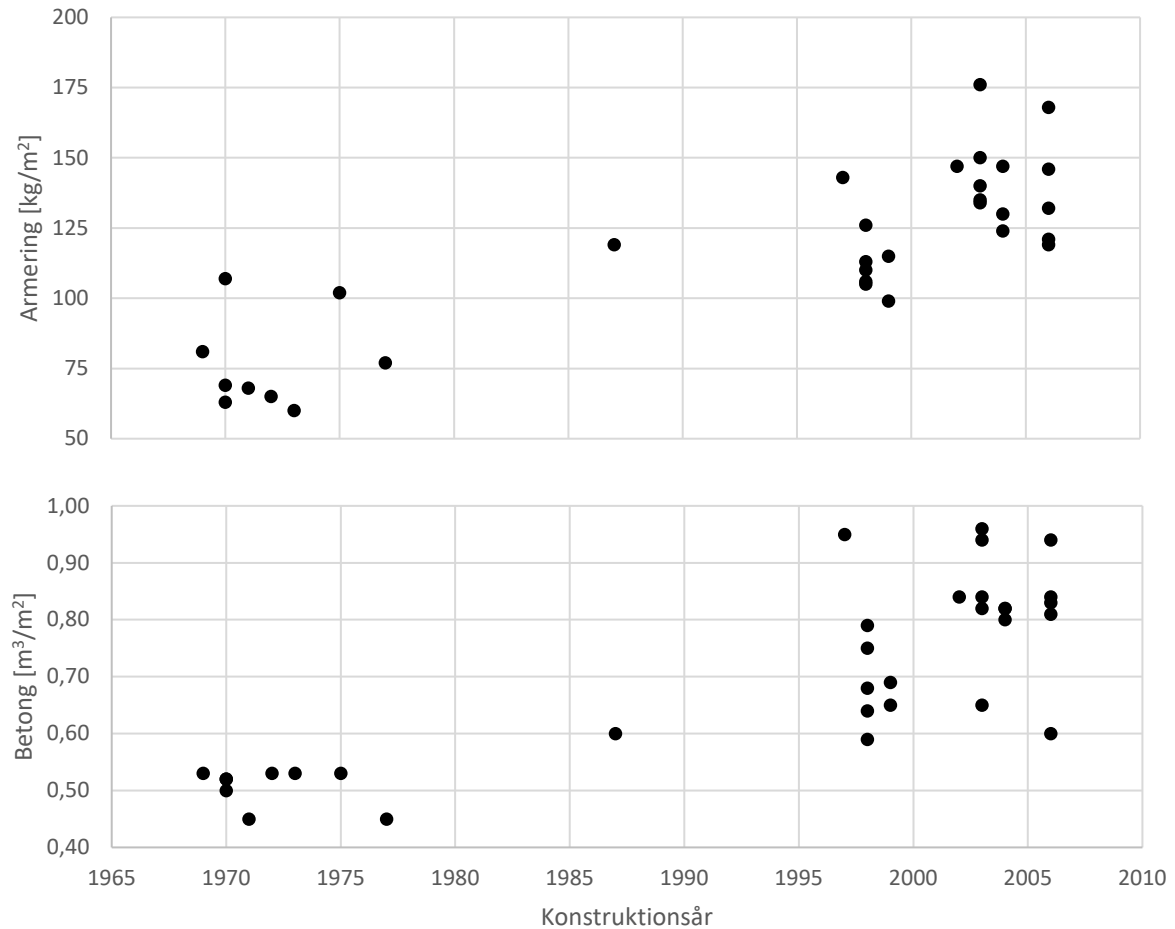
En hypotes som lyfts fram inom arbetsgruppen för detta projekt är att utvecklingen som drivits de senaste decennierna har inneburit att projekterings- och byggprocessen för byggnadsverk successivt blivit mer konservativ. Med andra ord, det finns tydliga indikationer att material- och resursåtgång har ökat över tid. Att undersöka den hypotesen, samt utvärdera i vilken utsträckning observerade förändringar är motiverade, är ett av huvudsyftena i detta projekt.

Forskning inom detta område är av begränsad omfattning både internationellt och i Sverige. En övergripande litteratursökning¹ (s.k. *scoping study*) av internationella publikationer ledde inte till några relevanta resultat. I ett svenskt forskningsprojekt finansierat av SBUF, Bygginnovationen (2010), redovisades i en av bilagorna (C) en jämförelse mellan 34 förspända lådbalksbroar i betong, byggda mellan 1969 och 2006. Enligt rapporten visade resultaten på en *genomsnittlig ökning*² över denna tidsperiod med 53% för armeringsmängd och med 50% för betongvolym i broarnas överbyggnad, se Figur 2.2. När enskilda fall jämförs är den maximala ökningen även högre (med över 100% mer material i vissa fall).

Mer nyligen i början av 2020-talet, i ett järnvägsprojekt i södra Sverige, observerades en betydlig materialökning när en ny bro jämfördes med en existerande som byggdes nästan 50 år tidigare (Joelsson 2021). Exemplet, som beskrivs närmare i avsnitt 2.3.2, sammanfattades i en industriblogg av företaget Sweco AB och var den tändande gnistan som initierade detta forskningsprojekt.

¹ Sökning gjordes 2025-01-15 i söksystemet Scopus: (TITLE-ABS-KEY (material AND (use OR usage OR consumption) AND (histor* OR compar*))) AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Bridges"))

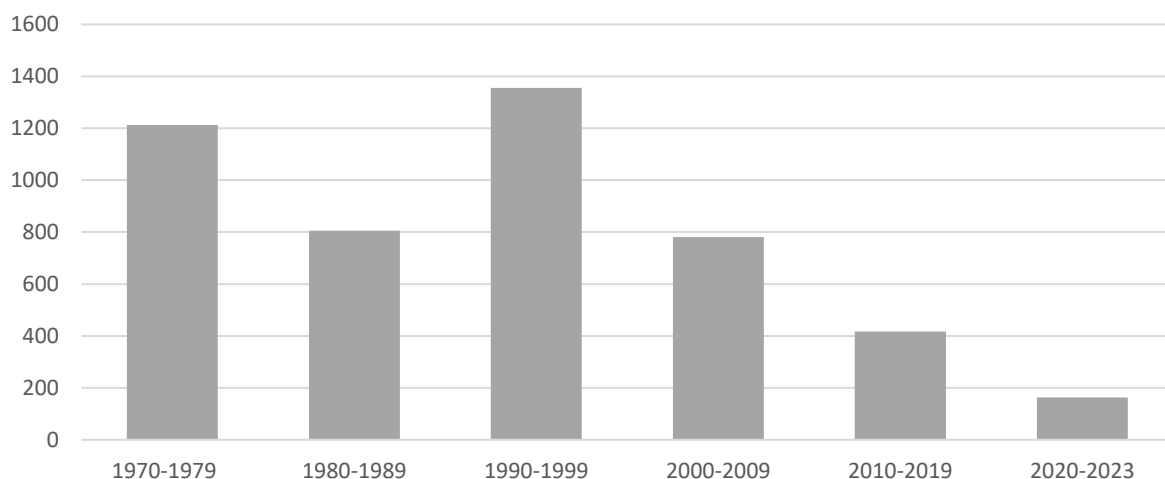
² Beräknad ökning enligt Bygginnovationen (2010) erhålls genom att jämföra medelvärden för materialåtgången i broarna byggda 1998-2006 med broarna byggda 1970-87.



Figur 2.2. Materialutveckling i förspända lådbalksbroar av betong i 34 broar konstruerade mellan 1969 och 2006 (enligt data från Bygginnovationen 2010). Övre figur visar total armeringsmängd i överbyggnad (inklusive spännarmering) och nedre figur visar betongvolym i överbyggnad.

2.2 Materialåtgång över tid - plattrambroar i Sverige det senaste 50 åren

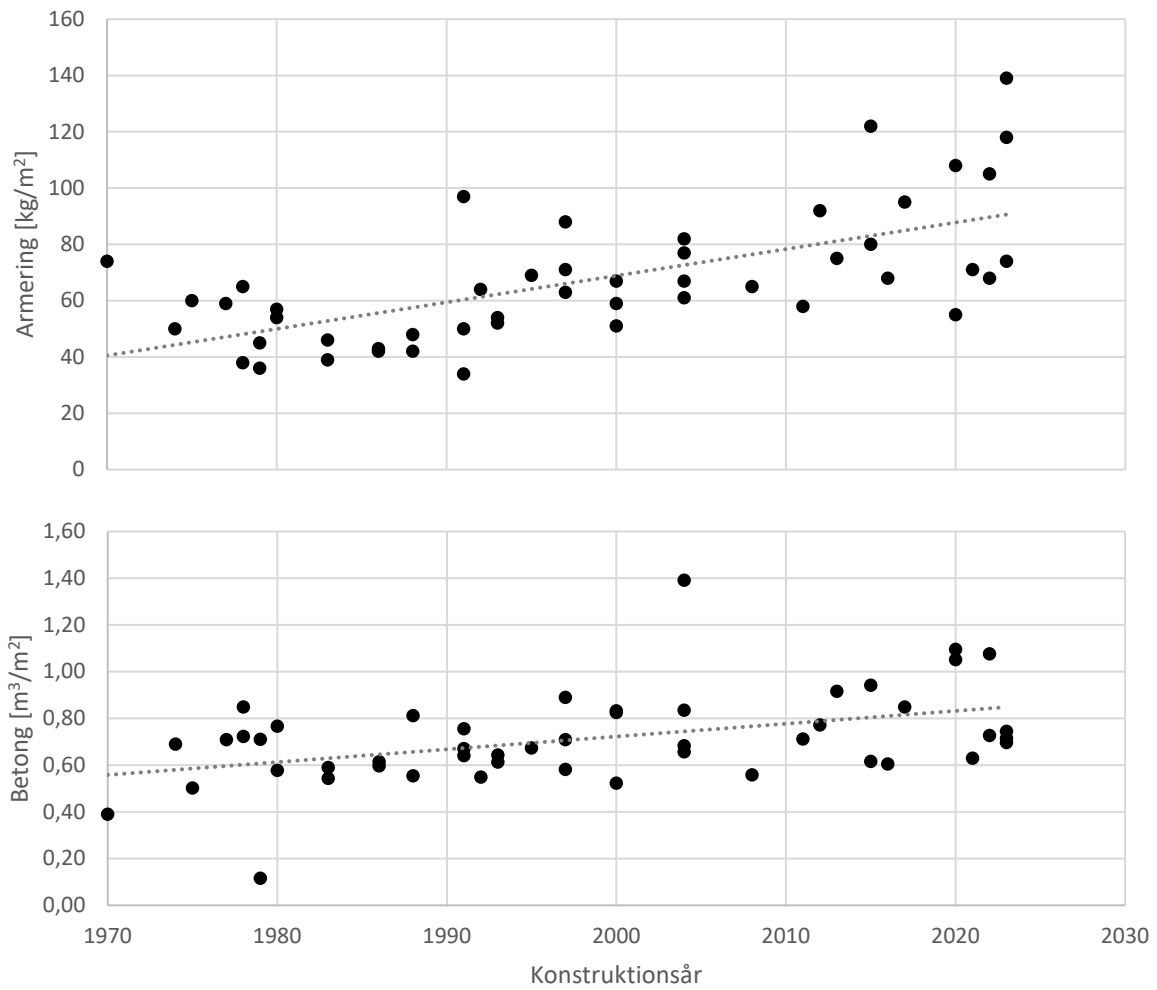
I detta avsnitt presenteras en bredare historisk undersökning av en mycket vanlig brotyp i Sverige, plattrambroen. Detta är en enkel brotyp (oftast) av armerad betong som klarar av spännvidder omkring 20-25m och upp till ca 35m när förspänningskablar används (Sundquist 2005). Att just den brotypen valdes i detta projekt beror till en viss del på dess enkelhet men också på grund av hur vanlig den är i Sverige. Trafikverket förvaltar närmare 22 tusen broar i Sverige varav plattrambroar är de mest vanliga (>7500). Figur 2.3 visar antal plattrambroar byggda mellan 1970 och 2023 (totalt ca 4700). Under våren 2024 genomfördes ett examensarbete på LTH med stöd av Trafikverket vars syfte var att kartlägga materialökningen samt undersöka hur plattrambroarnas tillstånd har utvecklats över tid (Turell & Tengvall 2024). Arbetet fokuserade på plattrambroar registrerade i Trafikverkets förvaltningssystem BaTMan och begränsades till broar byggda mellan 1970 och 2023. Resultaten som redovisas nedan sammanfattar detta arbete.



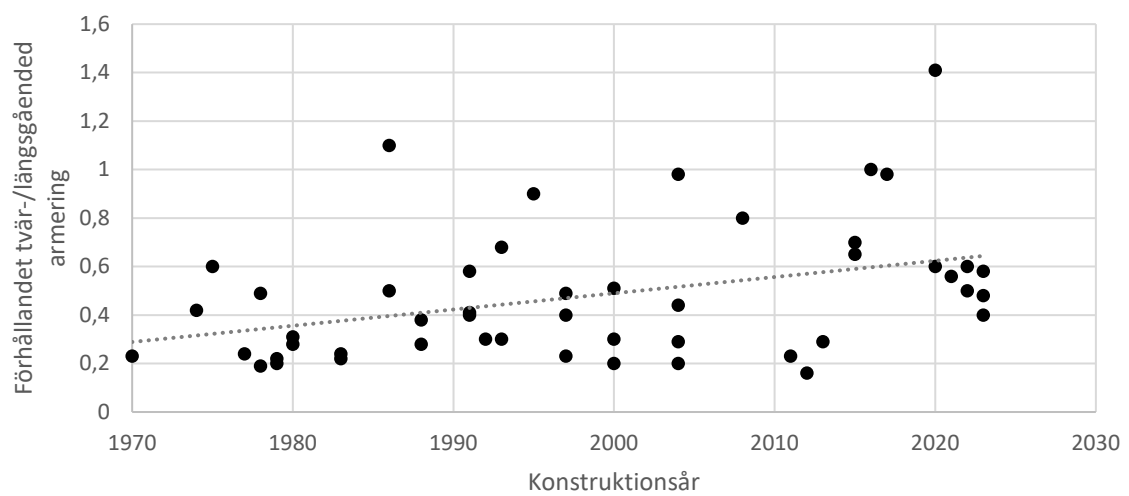
Figur 2.3. Antal plattribroar registrerade i förvaltningssystemet BaTMan uppdelat på konstruktionsår

En jämförelse gjordes på ett urval av slakarmerade plattribroar byggda mellan 1970 och 2023. Totalt analyserades 49 plattribroar från förvaltningssystemet BaTMan med jämförbara spännvidder i området 13-16m. Av dessa är 20 broar rätvinkliga och 29 snedvinkliga. Fokus var på broarnas överbyggnad där betongvolym och armeringsmängder utvärderades utifrån ritningar, som fanns tillgängliga i BaTMan. Armeringsmängderna erhöles systematiskt genom att analysera fyra-sex delytor för varje bro (fler delytor valdes för snedvinkliga broar). Ett representativt värde för varje bro beräknades därefter som ett medelvärde över alla delytor.

Resultaten (normaliserade i förhållandet till brobaneplattans area) visar på en tydlig ökning över tid, för såväl armeringsmängd som betongvolym i överbyggnaden; se Figur 2.4. Om vi jämför broar byggda 1970-1990 med perioden 2003-2023 är den genomsnittliga ökningen 69% för armering och 34% för betong. Den trend som visas i Figur 2.4 överensstämmer med resultat enligt tidigare studier på förspända lådbalksbroar; se avsnitt 2.1 och Figur 2.2. Om vi jämför rät- och snedvinkliga broar blir trenderna över tid desamma. Största skillnaderna är att snedvinkliga broar har i medel större mängder material (ca. 10-20% mer armering och betong). Detta är förväntat eftersom snittkrafterna i snedvinkliga plattribroar är generellt sett högre jämfört med rätvinkliga broar (pga tillkommande effekter från vridning).



Figur 2.4. (Övre) Armeringsmängd och (nedre) betongmängd i brobaneplatta för 49 platttribroar byggda mellan 1970 och 2023 (baserat på data från Turell & Tengvall 2024)



Figur 2.5. Förhållandet mellan tvär- och längsgående armeringsmängd i brobaneplatta för 49 platttribroar byggda mellan 1970 och 2023 (baserat på data från Turell & Tengvall 2024)

Utöver total mängd betong och armering i överbyggnaden, analyserades även förhållandet mellan armeringsmängder i tvär- och längsgående riktningar. Resultaten visar en genomsnittlig ökning av detta förhållande på 61% vilket tyder på att betydligt mer tvärgående armering används nu än för 50 år sedan, se Figur 2.5. Det är dock viktigt att lyfta fram att variationen är större i detta fall vilket innebär att det finns olika sätt att utvärdera mängd tvärarmering som behövs; se även avsnitt 4.3 om hur analysmetoder och resultattolkning kan påverka armeringsmängder för just en plattrambro. Om vi jämför resultaten uppdelade på rät- och snedvinkliga broar är den relativa ökningen över tid lite större för rätvinkliga broar.

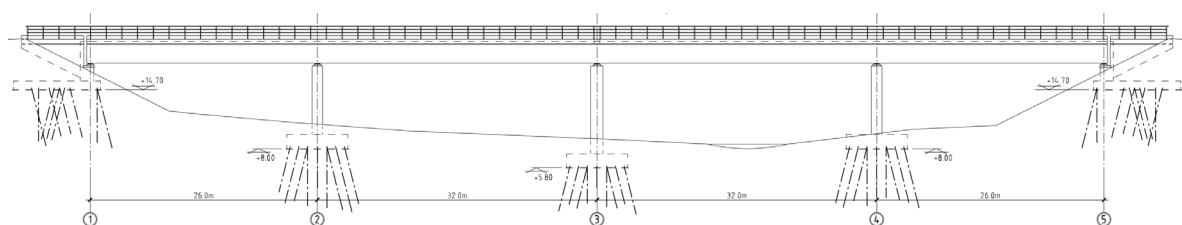
2.3 Möjliga orsaker – en studie av fyra olika jämförelseobjekt

2.3.1 Bakgrund

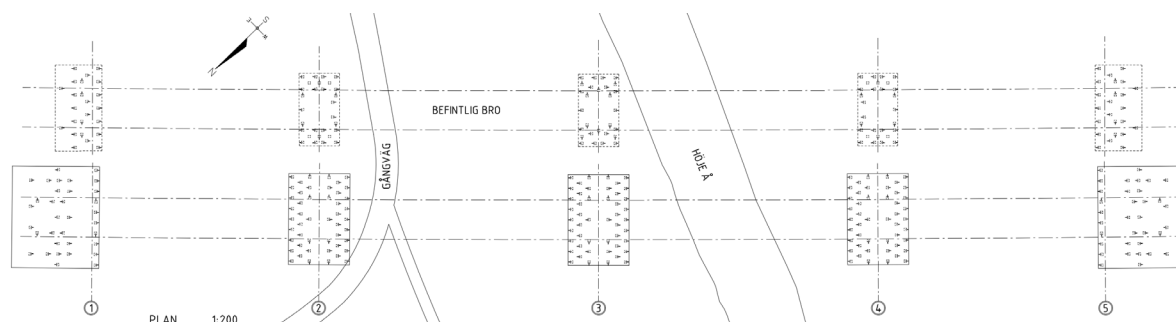
I detta avsnitt redovisas fyra specifika fallstudier där materialökning har observerats mellan jämförbara byggnadsverk uppförda i Sverige. I dessa fall görs direkt jämförelse mellan en ny och en betydligt äldre konstruktion med likvärdig funktion. Huvudsyftet med detta är att identifiera orsaker som kan leda till en ökning av materialmängder (mer detaljerade analyser av utvalda faktorer görs i avsnitt 3 till 5). Mer detaljerade beskrivningar av respektive fallstudie redovisas i bilaga A.

2.3.2 Järnvägsbroar över Høje å

Jämförelseobjekten är två järnvägsbroar i Lund, i södra Sverige. Broarna över Høje å är spännarmerade lådbalksbroar i fyra spann för järnvägstrafik (dubbelspår) som konstruerades 1975 och 2021, se Figur 2.6 och Figur 2.7. Broarna har samma spännvidd (26m ytterspann, 32m innerspann) och båda broarna har konstruerats av samma företag och samma konstruktör har varit inblandad i såväl den gamla som ny bron.



Figur 2.6. Elevationsritning för nya bron över Høje å.



Figur 2.7. Planritning av grundläggningen för gamla och nya bron över Høje å

Jämförelse mellan broarna visar på en totalökning både vad gäller mängd betong och armering (45% respektive 168%). Det som tydligt framgår av Figur 2.7 är att den största materialökningen har skett i konstruktionens underbyggnad.

De statiska systemen för bägge broarna är jämförbara med två undantag: (1) den nya bron har dilatationsfogar i spåren vid landfästen medan gamla bron har kontinuerliga spår och (2) mittpelarna i gamla bron är fast inspända i anslutning till brons överbyggnad och i den nya bron finns det fasta lager. Båda dessa faktorer ledde till en ökad belastning från bromskrafter i brons underbyggnad och särskilt i pålgrupperna. Det mest betydande effekten anses dock vara valet att sätta in en dilatationsanordningen i nya bron som, tillsammans med lastförutsättningarna i gällande Eurokod, innebär en betydligt större bromskraft i nya bron jämfört med den gamla.

Vid tiden när bron byggdes var det högst osäkert om en dilatationsfog behövdes (eftersom den gamla inte hade någon sådan). I den gällande byggnormen fanns möjlighet att göra en så kallad TBI analys (*Train-bridge-interaction*) som underlag för beslut gällande dilatationsfog, se även avsnitt 3.2.2. Detta ansågs dock för komplext och osäkert att genomföra vid den tiden – varken brokonsult eller kontakter vid Trafikverket ville ta beslut om att bygga bron utan dilatationsfog. Värt att nämna är att en TBI analys i det här fallet leder till samma beslut enligt gällande Eurokoder³, oavsett om det statiska systemet för den nya eller gamla bron analyseras (se bilaga A.1).

Utöver en ökad bromslast, noterades att den permanenta lasten för ballast som användes vid dimensioneringen hade ökat jämfört med den gamla bron. Denna ökning, som är av storleksordningen 70%, anses vara den huvudsakliga källan till materialökning i överbyggnaden.

Sammanfattningsvis anses att projektbeslut, komplicerat regelverk och ändringar i lasterna i regelverk har lett till den ökade resursförbrukning för detta exempel. En mer detaljerad analys av aktuella broar redovisas i Bilaga A.1.

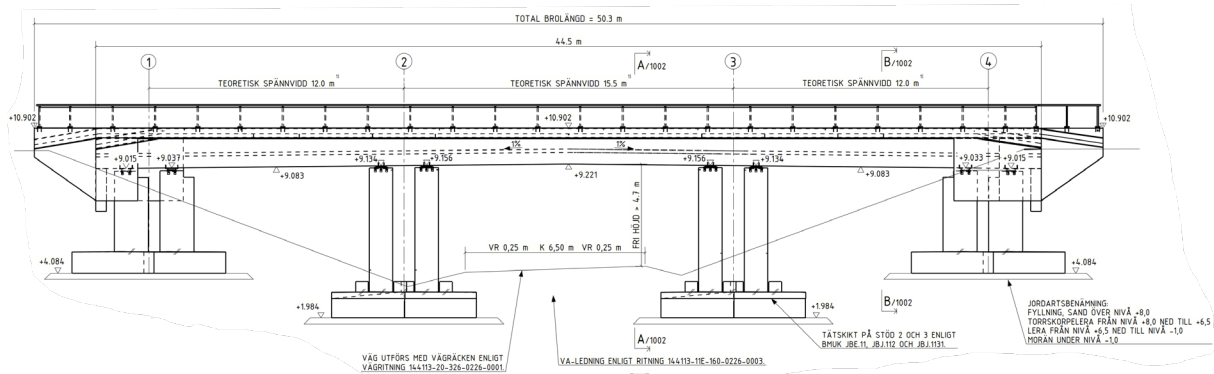
2.3.3 Järnvägsbroar i Ängelholm

Järnvägen mellan Ängelholm och Helsingborg (Maria) byggdes 2020 ut till dubbelspår varvid det byggdes en ny bro precis bredvid en gammal med väldigt lik utformning. Broarna över väg 1438 är balkbroar i tre span för järnvägstrafik (dubbelspår) som konstruerades 1990 och 2022, se Figur 2.8 och Figur 2.9. Broarna har samma spännvidder (12m ytterspann, 15,5m mittspann) och jämförbara statiska system.

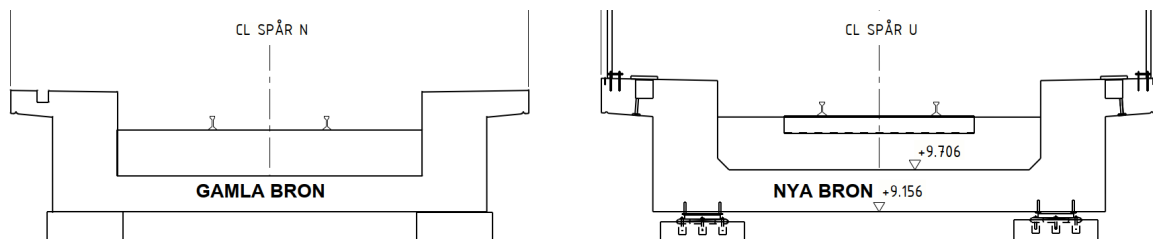
Jämförelsen mellan broarna visar på en ökning av armeringsinnehållet i överbyggnaden med 62%. Ökning i betongmängderna var dock inte lika stor (ca 25%). Fyra huvudsakliga orsaker har identifierats som drivande för den ökade materialförbrukningen:

- Bruksstadiet med sprickviddskrav
- Utmattningskontroll för ny bro men inte den äldre bron
- 3D-effekter inkluderades i beräkning för ny bro
- Minimiarmeringskraven har ökat för ny bro

³ De kommande Eurokoderna medger däremot högre tillåtna rälsspänningar och enligt dessa hade bron kunnat byggas utan dilatationsanordningar.



Figur 2.8 Elevationsritning för nya bron över väg 1438



Figur 2.9 Sektionritning genom broarna över väg 1438

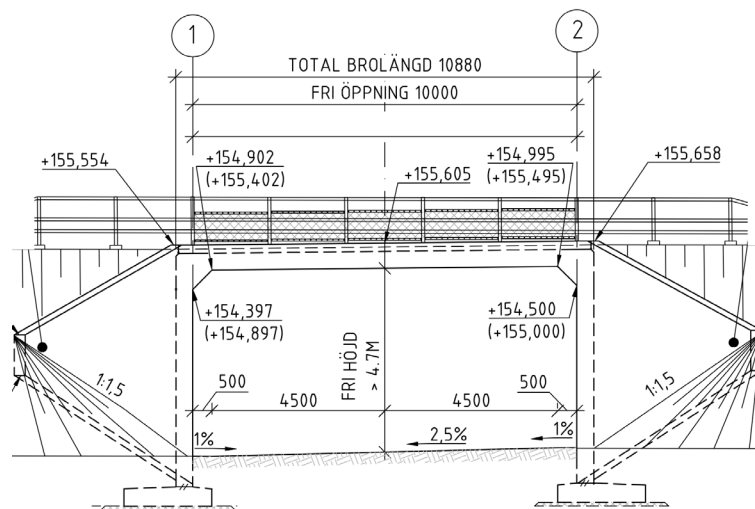
Det är tydligt i detta fall att ändringar i regelverk har varit betydelsefulla. En viktig skillnad från tidigare exemplet är att för järnvägsbroarna i Ängelholm var det dimensioneringskraven och inte lastförutsättningar i gällande byggnorm som var viktiga. Värt att notera är att skillnader i de vertikala tåglasterna för de olika normerna (tåglast LM71 i Eurokod och 1960 års belastningsbestämmelser) har inte ökat armeringsmängderna.

Utöver kraven i byggnormen, visade detta exempel att modelleringssättet kan ha en effekt på den mängd material som räknas fram. Den nya bron modellerades genom 3D FEM beräkningar medan den gamla beräknades i 2D. Just i detta fall är det snedvinkliga stöd som innebär vridning i brons överbyggnad men även ger ändringar i längsgående moment (även för centrisk belastning). Att hantera dessa effekter i en 2D beräkningsmodell är svårt.

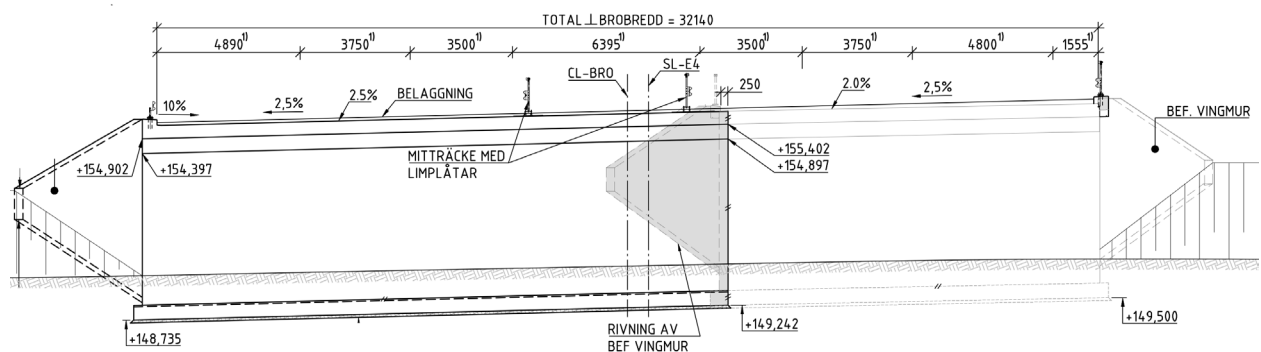
Sammanfattningsvis anser vi att ändringar i kraven i regelverk har lett till ökad resursförbrukning för detta exempel. Mer detaljerad analys för aktuella broar redovisas i Bilaga A.2.

2.3.4 Vägbro E4, Ljungby

Bron är en breddning av en befintlig plattrambro för vägtrafik som konstruerades 1978 respektive 2020, se Figur 2.10 och Figur 2.11. Detta innebär att brons geometriska tvärsnitt inte ändrades och därför blev det fokus på mängd armering i bron, och specifikt i brons överbyggnad.



Figur 2.10 Elevationsritning för bro i Ljungby



Figur 2.11 Sektionsritning för bro i Ljungby

En jämförelse mellan broarna visar på en ökning av armeringsinnehållet i brobanan med 72 till 84%. Två huvudsakliga orsaker har identifierats som drivande för den ökade materialförbrukningen:

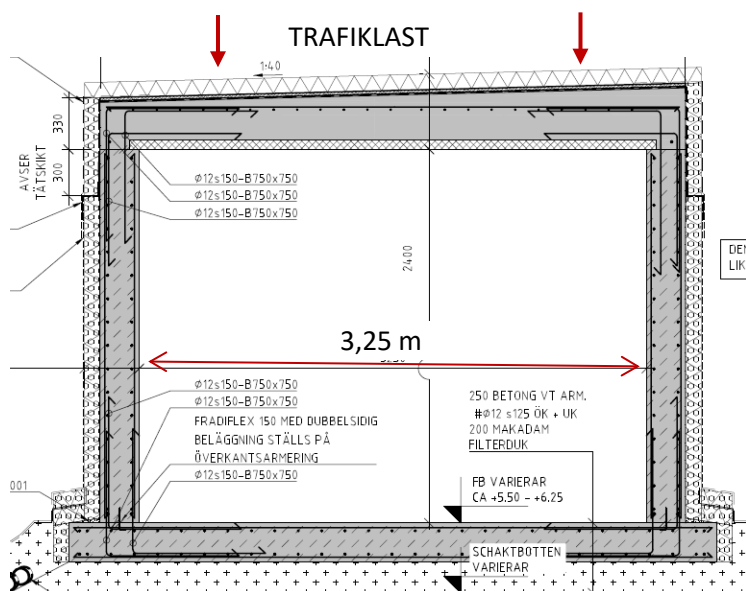
- 3D-effekter inkluderades i beräkning för ny bro
- Avkortning av armering har försummats i ny bro

För just detta exempel analyserades även hur stort bidrag varje del har haft vad gäller materialförbrukningen. Den största delen, som orsakade en 66% ökning i armering, kan ses som 3D effekter (för avkortning blev andelen 22%). Den nya bron beräknades i ett 3D FEM-program och den gamla med 2D ramberäkningar. Detta resulterar i ett betydligt större behov av armering i nya bron, särskilt i tvärlädd, men även i längsriktning.

När det gäller avkortning av armering, försummades detta för nya bron. Värt att nämna är att armeringen i brons längdriktning har inte ökat trots ökade trafiklaster och slutsatsen är att den stora ökningen av armeringen ligger i brons tvärriktning. Mer detaljerad analys för aktuella broar redovisas i Bilaga A.3.

2.3.5 Transportkulvertar Malmö allmänna sjukhus

Omfattande nybyggnad och ombyggnad på sjukhusområdet skedde kring 2020. Ett kulvertsystem under jord från 60-talet fanns redan på området. Detta kompletterades med nya kulvertar. Exempel på tvärsnitt för en ny kulvert (C) med inre bredd 3,25 m byggd kring 2020 visas i Figur 2.12.



Figur 2.12 Tvärsnitt av transportkulvert C inom sjukhusområde.

Från detta projekt har vi jämfört tre liknande kulvertar A-C för att undersöka skillnader i utformning, se Tabell 2.1. De nya kulvertarna B och C projekterades av olika företag. Samtliga kulvertar bär samma typ av trafiklast. Det framgår av Tabell 2.1 att båda de nyare kulvertarna (B och C) har signifikant mer armering än kulverten (A) från 1960. Vi ser också en stor skillnad både i mängd betong och armering mellan kulvert B och C utformade av två olika företag.

Tabell 2.1. Jämförelse av mängder för likartade kulvertar

ID	Byggår	Inre bredd [m]	Betong [m ³ /m kulvert]	Jämförelsetal betong [-]	Armering [kg/m kulvert]	Jämförelsetal armering [-]
A	1960	3,0	3,2	1,0	156	1,0
B	2020	3,17	4,9	1,52	760	4,9
C	2020	3,25	3,4	1,06	550	3,5

Huvudorsaken till skillnader i armeringsmängd i detta fall är ändringar i reglerna för minimiarmering eller schablonarmering, vilka skärpts betydligt över tid. Mängden schablonarmering jämförs i Tabell 2.2 mellan de olika varianterna. Man kan också se att det nuvarande regelverket kring minimiarmering tolkas på signifikant olika sätt av olika konstruktörer.

Tabell 2.2. Jämförelse av schablonarmering och betongmängd mellan olika kulvertvarianter

ID	Byggår	Schablonarmering Ut-och insida längs- och tvärriktning	Armerings-area/lager [mm ² /m]	Jämförelse- Tal [-]
A	1960	ϕ 10 s 300	262	1,0
B	2020	ϕ 16 s 120	1675	6,4
C	2020	ϕ 12 s 125	904	3,5

Ökningen av mängden betong med ca 50 % i kulvert B är svårare att förklara, se Tabell 2.1. Ökning av tjocklekar för väggar, valv och bottenplatta kan inte förklaras med behov att ta upp laster. Orsaken är sannolikt konservativa beslut och frånvaro av incitament att spara mängder. Ökningen för kulvert C är enbart marginell och beror huvudsakligen på något ökade dimensioner för denna jämfört med kulvert A.

Detaljerad analys för aktuellt fall redovisas i Bilaga A.4.

2.4 Tillståndsbedömning av broar över tid

2.4.1 Bakgrund

I tidigare avsnitt har vi visat på en ökning av materialåtgång över tid samt lyft fram olika orsaker som kan leda till denna typ av ökning. En viktig följdfråga är då om den ökningen är faktiskt motiverad. För att kunna svara på den frågan behöver vi undersöka om hur broarnas tillstånd har ändrats över tid. Ett viktigt underlag för en sådan analys är förvaltningsdata i BaTMan-systemet.

Samtliga broar under Trafikverkets ansvar genomgår inspektioner, ofta utförda av externa inspektörer. Inspektionsdata registreras i BaTMan-systemet, vilket utgör en viktig grund för beslut om nödvändiga åtgärder. Vid varje inspektion dokumenteras aktuella skador och deras fysiska och funktionella påverkan för delar av konstruktionen. Det funktionella tillståndet beskrivs genom s.k. tillståndsklasser (TK) som bedöms utifrån elementets funktionella egenskaper, ställda funktionskrav, aktuella och tidigare mätvärden (dvs. skador) samt förväntad framtida nedbrytning (Trafikverket 2019). Gränsvärden anges av Trafikverket för olika skadetyper och erhålls som stöd vid inspektioner för att bedöma tillståndsklasser (t.ex. uppmätt maximal sprickvidd).

Tabell 2.3. Tillståndsklasser i BaTMan (Trafikverket 2019)

Tillståndsklass	Förklaring
TK0	Bristfällig funktion bortom 10 år.
TK1	Bristfällig funktion inom 10 år.
TK2	Bristfällig funktion bortom 3 år.
TK3	Bristfällig funktion vid inspektionstillfället

I Tabell 2.3 redovisas en förklaring av tillståndsklasserna TK0-TK3 baserade på begreppet bristfällig funktion hos olika delar av bron, samt när i framtiden detta bedöms kunna inträffa. I vissa fall kan även bärigheten⁴ för en bro behöva uppdateras om det anses att en skada kan ha försämrat hållfastheten. Det är värt att nämna att metoder för bärighetsklassning av broar byggda vid olika

⁴ Bärigheten beskriver för vägbroar tillåtna axel- och boggilaster (A/B värden) samt för järnvägsbroar linjekategori

tidsepoker har inte studerats här men det förefaller rimligt att anta den har också skärpts över tid (t.ex. pga utveckling i föreskrivna laster från regelverk – se avsnitt 3.2).

2.4.2 Platttribroars tillstånd över tid

För att svara på frågan om broar har bättre kvalitet nu än för 50 år sedan har statistik från förvaltningssystemet BaTMan tagits ut och analyserats. Om antal och storlek på skador minskat signifikant över tid är det troligt att det beror på bättre kvalitet hos nyare broar. För att få tillförlitlig statistik krävs vanligt förekommande skador ur ett stort brobestånd. Skadorna som analyserats här har därför valts att omfatta sprickor i farbaneplattor på platttribroar. Sprickor i kantbalkar har inte inkluderats. Tabell 2.4 visar antalet broar som byggts under olika tidsperioder samt alla registrerade sprickor som finns eller har funnits sedan dessa broar byggts. Utifrån detta beräknades även medelantalet sprickor per bro.

Tabell 2.4. Antal sprickor som är registrerade i BaTMan för broar byggda mellan 1970 och 2023 (data tagit från Turell & Tengvall 2024)

	1970-79	1980-89	1990-99	2000-09	2010-19	2020-23
Antal byggda platttribroar	1212	805	1355	781	417	163
Antal sprickor i överbyggnad	729	299	323	16	39	24
Medelantal sprickor per bro	0,60	0,37	0,24	0,02	0,09	0,15

Generellt är frekvensen av sprickor mycket låg för såväl gamla som nyare broar, lägre än 0,60 sprickor per bro. Man kan dock se att broar byggda under 70-talet, som inte dimensionerats för ett nyanserat sprickviddskrav, har ett något större antal sprickor per bro än broar dimensionerade enligt BBK 79 eller senare regler. Man kan även se att nyare broar har lägre antal sprickor per bro än broar från 80- och 90-talet. Anledningen är troligtvis kraven på mer minimiarmering i nyare broar. Strängare sprickviddskrav i vissa miljöer, som infördes i Bro 2004, kan också vara anledning till lägre antal sprickor i nyare broar. Om man jämför medelantal sprickor per bro från perioderna 2000-2009 och 2010-2023 så verkar inte 3D-dimensionering, som infördes 2011, ha bidragit till mindre antal sprickor i farbaneplattor hos platttribroar.

Tabell 2.5 visar resultat från samma uppsättning broar men uppdelat på olika bedömda tillståndsklasser. Resultaten visar att totalt ca 75% av alla brobaneplattor från alla perioder registrerats i TK0 och endast 5% bedömdes sämre än TK1. Detta innebär att i 95% av samtliga fall fanns inga observationer av särskild signifikans för broarnas funktion. Det är svårt att jämföra tillståndsklasser mellan broar byggda vid olika tidsepoker men trenden speglar i huvudsak bilden i Tabell 2.4. Tyvärr ger en vidare analys av skadeinformationen begränsad information på grund av den stora variationen i inspektionsdata och svårigheten att klassificera skador i en bro (se även Björnsson et al. 2019).

Tabell 2.5. Uppdelning i tillståndsklasser

Tillståndsklass	Totalt
TK0	75%
TK1	20%
TK2	4%
TK3	1%

När man drar slutsatser från statistiken ovan måste man ha i åtanke att det även finns en tidsfaktor. Det är naturligt att en äldre bro, som exponerats för last och väder under längre tid, har fler sprickor än en nyare bro. Det verkar ändå som att man kan se en viss utveckling mot mer sprickfria plattrambroar under de senaste 50 åren. Detta är inte orimligt med tanke på den kraftiga ökning av armeringsmängder över tid som har observerats. Men generellt är tillståndet när det gäller brobaneplattor även i äldre plattrambroar på tillfredsställande nivå. Frågan är därför om de öknings av armeringsmängder som skett med ökade kostnader och klimatavtryck faktiskt är motiverade. Det är också klart orimligt och närmast tjänstefel att generellt sträva efter helt sprickfria betongbroar.

2.4.3 Jämförelseobjektens tillstånd

Tillståndsbedömningar har gjorts för vart och ett av de äldre jämförelseobjekten som redovisades i avsnitt 2.3.2 till 2.3.5. För broarna tog vi del av information från förvaltningssystemet BaTMan och för den gamla kulverten från 1960 finns en bärighetsutredning gjord av en extern konsult (Skanska 2018). I samtliga fall fanns det inga kritiska skador och bärigheten var tillräcklig för att de gamla konstruktionerna kunde hållas i bruk. För just broarna fanns det få skador (aktuella eller åtgärdade) kopplade till lastpåverkningar och det som fanns registrerat i BaTMan system var antingen vanligt förekommande problem (t.ex. kopplade till kantbalk) eller observationer av byggfel.

Mer detaljerad information redovisas i bilaga A.

2.5 Sammanfattning

Det är tydligt att materialvolymen för våra broar har ökat över tid och en nyckelfråga här är om den ökningen som observerats har gett bättre prestanda eller bara kan ses som slöseri med resurser och material. Med de undersökningarna vi har gjort har det visat sig vara svårt att få ett entydigt svar på denna fråga, men de visar ändå tydliga indikationer på att tillståndet hos äldre byggnadsverk är inte är sämre jämfört med nya. Det är därför viktigt att fortsätta att systematiskt undersöka kvaliteten hos äldre konstruktioner för att få underlag att förbättra dagens projekteringsarbete och byggprocess. Men innan detta kan göras krävs en djupare analys av identifierade faktorer som kan orsaka en ökning av materialåtgång.

I en del av jämförelseobjekten i avsnitt 2.3 var det just ändringar i regelverk som legat bakom ökningen där antingen kraven på konstruktionen (t.ex. minimiarmering) eller ändringar i lastförutsättningar (t.ex. bromslaster) har bidragit till en ökning. Förändringar i regelverk och normer det senaste 50 åren analyseras närmare i avsnitt 3.

En annan viktig faktor som identifierats är förändringar i projekteringsarbetet som skett de senaste 50 åren. En betydande utveckling av hur ingenjörer analyserar byggnadsverk har också skett det senaste halvsekle. Förr i tiden gjordes mycket för hand eller med enklare 2D beräkningsmodeller medan det nu är standard att använda 3D finita elementanalyser (även för enklare byggnadsverk). Konsekvenserna av detta beskrivs mer utförligt i avsnitt 4.

Beslut som tas i tidiga skeden kan också ha en stor betydelse för hur mycket material som används i ett byggnadsverk. Sådana beslut kan exempelvis *låsa in* geometrier och andra strukturella randvillkor som kan innebära mindre utrymme för materialbesparing vid senare skede. Detta diskuteras närmare i avsnitt 5.

3 Förändring av regelverk och normer under 50 år

3.1 Bakgrund

I tidigare avsnitt lyftes fram att en bidragande orsak till materialökning i nyare broar är förändringar i regelverk. Fokus i denna rapport är framför allt regler för utformning och dimensionering av broar inklusive relevanta tillämpnings- och tilläggsregler. Förr i tiden fanns ett vanligt förekommande begrepp *bronorm*, som de senaste 50 åren i Sverige har beskrivits i en rad olika dokument. Följande är en lista över *vägbronormer* sedan 1969 (se även bilaga B.2):

- 1969, VV Bronormer 1969
- 1976, VV Bronormer 1976
- 1988, Bronorm 88
- 1994, Bro 94
- 2002, Bro 2002
- 2004, Bro 2004
- 2009, TK Bro
- 2011, TRVK Bro 11
- 2016, Krav Brobyggande (gäller fortfarande)
- 2020, Krav TRVINFRA-00227

En viktig förändring inträffade 2009 när TK (Tekniskt Krav) Bro togs i bruk. Då bestämdes det att dimensionering av alla broar skulle göras enligt det gällande europeiska konstruktionsstandarder, s.k. Eurokoder⁵ (SS-EN 1990 till SS-EN 1999). Detta innebär i praktiken att hänvisningar görs från bronormen till just Eurokoderna tillsammans med nationella tillämpningsregler *beskrivna i Transportstyrelsens föreskrifter och allmänna råd* (TSFS 2018:57).

Att jämföra regelverk de senaste 50 åren är ett mycket omfattande arbete och i denna rapport ligger fokus istället på att undersöka vissa delområden som valts ut på basis av slutsatserna från fallstudierna. Några generella slutsatser är dock värda att nämna kopplade till utvecklingen av regelverk för brobyggandet i Sverige:

- Regelverkets volym och komplexitet har ökat över tid (vilket exemplifieras genom det ökade antal dokument samt den totala mängden sidor, se avsnitt 4.2).
- Dimensioneringsfilosofi och specifikt säkerhetsformat har ändrats över tid, vilket gör att det är svårt att jämföra till exempel lasterna från de äldsta normerna med dagens regelverk.

Den senare punkten belyses delvis i nästa avsnitt om förändringar i lastförutsättningar föreskrivna i regelverk.

3.2 Lastförutsättningar föreskrivna i regelverk

En viktig del i utformning och dimensionering av byggnadsverk är att kontrollera så att konstruktionen bär alla externa laster. Historiken med kvantitativa lastvärden för broar är bara ca 100 år gammal och kom först när fordonsvikterna ökades (t.ex. för tåg) samtidigt som konstruktionerna blev mer slimmade (Dawes 2003). De tidigaste lastbestämmelserna var

⁵ Vid skrivandet av denna rapport pågår arbete med att införa andra generationen eurokoder.

standardiserade laster (*standard loading train*) som speglade en extrem verklig belastningssituation. Moderna regelverk beskriver däremot lastmodeller där osäkerheter kopplade till både lasterna och i viss mån konstruktionen finns inbakade. Dagens lastmodeller beskriver kan därför inte direkt jämföras med *verkliga* laster.

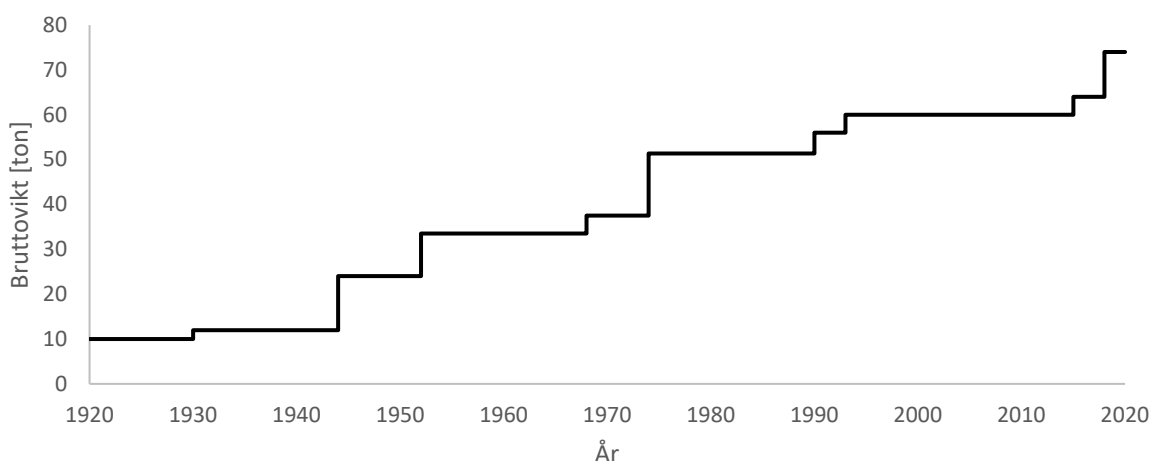
Metodiken för att hantera osäkerheter i moderna regelverk kallas för säkerhetsformat. I grunden handlar det om att använda säkerhetsfaktorer för att justera last och/eller kapacitet för att uppnå en viss önskad säkerhetsmarginal. Dagens regelverk använder ett säkerhetsformat *partialkoefficient-metoden* där s.k. partiella (säkerhets)koefficienter appliceras som ökar lasterna ytterligare. Partialkoefficienterna kalibreras med hjälp av probabilistiska metoder och utifrån mycket enkla dimensioneringsfall (t.ex. en balk i böjning). I Sverige har partialkoefficientmetoden funnits i bronormerna sedan 1988. Den utvecklingen, tillsammans med ändringar i hur lasterna grundvärden definieras (se bilaga B.2.2), innebär att lasterna före ca 1985 inte är direkt jämförbara med laster i nuvarande normformat.

En annan viktig aspekt som är värd att nämna är att det finns ett separat system för bärighetberäkning av befintliga brokonstruktioner (TRVINFRA-00331). Bärighetsklasserna (BK) avgör vilka fordonsvikter en bro eller väg får belastas med. Just nu finns det fyra BK-klasser där den högsta innebär att fordon med max 74 tons bruttovikt får trafikera en bro.

Mer detaljerade analyser finns i Bilaga B. De viktigaste slutsatserna från dessa, med bäring på konsekvenser för materialökning i byggandet sammanfattas i nästa två avsnitt.

3.2.1 Trafiklast på vägbroar

En analys över hur trafiklaster på vägbroar ändrats över tid visar en tydlig uppåtriktad trend, se bilaga B.1. Att en ökning har skett är förväntat med tanke på utvecklingen inom transportsektorn både vad gäller trafikvolym och fordonsvikter. Figur 3.1 visar tillåtna bruttovikter för fordon i det svenska vägnätet de senaste hundra åren.



Figur 3.1. Utveckling av tillåten bruttovikt för fordon i Sverige, se även bilaga B.1

De nu gällande lastmodellerna för vägbroar från Eurokod (SS-EN 1991-2:2003) är baserade på europeiska undersökningar från slutet av 1980-talet, där uppmätta trafikdata för tunga fordon på europeiska vägar användes som underlag (Calgaro 1998). Forskning inom Sverige har dock visat att

det underlag som användes vid kalibrering av lasterna i Eurokod är konservativt jämfört med mätdata från tunga fordon på svenska vägar (Carlsson 2006). Detta innebär en möjlighet att justera värdena i Eurokod för att bättre avspegla trafiken i Sverige.

En analys av gällande bronormer visar även att nya vägbroar dimensioneras för laster som är av storleksordningen 50% högre än de laster som används vid verifiering av befintliga broar i den högsta bärighetsklassen BK4, se bilaga B.3. Det är rimligt att ha en överkapacitet inför framtida lastökningar särskilt med beaktande av utvecklingen fordonsvikter, som beskrivs i Figur 3.1. Det finns också behov av överkapacitet för specialtransporter samt för att hantera risker från överbelastade fordon.

Slutsatsen är att det för närvarande finns en reservkapacitet av storleksordningen 40-50% när vi jämför nybyggda broar med befintliga broar som klassas för BK4. Om man i framtiden överväger ytterligare ökning av trafiklaster av t.ex. militära skäl bör man seriöst väga in negativa konsekvenser för klimatpåverkan, som uppstår speciellt för kortare broar.

3.2.2 Trafiklast på järnvägsbroar

I fallstudierna i avsnitt 2.3 har ändringar i lastförutsättningar på just järnvägsbroar lyfts fram. En närmare analys visar att både vertikala och horisontella tåglaster har ökat över tid, se bilaga B.2.3. Den exakta påverkan på en enskild konstruktion, i termer av potentiell ökad materialåtgång, är svår att bedöma pga ändringar i säkerhetsformat i konstruktionsreglerna. Utgår vi från tidigare fallstudier (avsnitt 2.3) är just ändringen i horisontella lasterna (bromslaster) mer intressant.

En annan aspekt som är värd att nämna är hur lastförutsättningarna i regelverken tolkas och tillämpas i praktiken, samt vilken påverkan detta kan ha för materialåtgången. Exemplet i avsnitt 2.3.2 belyser detta samspel i ett fall där projektbeslut samt ändringar i regelverk ledde till en kraftig ökning av den dimensionerande bromslasten. För just bromslaster har införandet av Eurokod år 2009 inneburit en kraftig ökning eftersom man i tidigare normer utförde en schablonmässig reduktion av bromslasten beroende på samverkan med helsvetsade räler och intilliggande järnvägsbank.

Eurokod SS-EN 1991-2:2003 kapitel 6.5.4 anger hur en kombinerad respons (*TBI analys = Track Bridge Interaction*) kan utföras för att beskriva samverkan mellan spår, bro och intilliggande järnvägsbank. Aktuellt kapitel i normen är skrivet utifrån att verifiera spänningar i rälen samt kontrollera om det erfordras dilatationsfogar. Den kombinerade responsen är relativt komplicerad att beräkna eftersom den innehåller bi-linjära fjädrar och lasterna inte kan superponeras. Reglerna i Eurokod är följaktligen mycket svåra att använda för att beräkna reduktionsfaktorer för bromslaster.

Ovanstående har observerats som ett problem i branschen och inom kort (hösten 2025) startas ett doktorandprojekt på LTH med samverkan från KTH för att belysa bromslaster och interaktion mellan räler och bro. Projektet finansieras av BBT och SBUF.

I intervjuundersökningen har dessutom framhållits av flera personer att olycksscenarier som innefattar urspårning av tåg leder till stora konsekvenser för dimensioneringen av järnvägsbroar.

Tidigare exempel om lastföreskrifter i Eurokod illustrerar ett problem som återkommande lyfts fram (t.ex. under en industriworkshop samt i intervjuerna): att Eurokod kan vara komplicerad och otydlig, vilket ökar risken för miss- och feltolkningar. Denna aspekt har även tidigare lyfts fram av forskare där regelverk jämförs med kommunikationssystem (Bulleit 2012). Regelverk bör tolkas som en kommunikationsväg i ett system vars *information* meddelas ingenjören för att stödja utformning och

dimensioneringsarbete. I detta sammanhang är det viktigt att beakta hur effektiv informationsöverföringen är samt beakta och undvika potentiella källor till *brus* (t.ex. komplexitet).

3.3 Skärpta krav på betongkonstruktioner

I detta avsnitt sätts fokus på en annan del av regelverket som fallstudierna visat kan orsaka en ökning av materialåtgång för betongbroar, nämligen beständighetskrav. De beständighetskrav som brukar ha störst påverkan på materialåtgången i betongbroar är krav på sprickvidd, minimiarmering samt krav på täcksikt. Krav på betongkvalitet kan utöver detta ge en viss ökad klimatpåverkan.

En omfattande del av den nybyggda infrastrukturen i städerna utgörs idag av underjordiska konstruktioner. Dessa konstruktioner utsätts för stora permanenta laster samtidigt som det finns höga krav på dem med avseende på t.ex. vattentäthet eller kemiskt angrepp. Detta leder till tjocka tvärsnitt och att armeringen även i bärande riktning dimensioneras av sprickbreddskraven.

Samtidigt finns det vanligtvis en tydlig sekundärriktning (t.ex. tunnelväggens längsriktning) som i princip inte utsätts för externa laster, dvs det är endast tvång som verkar. I dessa tjocka konstruktionsdelar utgör minimiarmering ofta en betydande del av materialåtgången. Beroende på hur konstruktören väljer att tolka krav och råd kan det bli en skillnad på flera hundra procent i liknande konstruktioner (se exempel i avsnitt 2.3.5). Det är inte heller ovanligt att det armeringsinnehållet i den *obelastade* riktningen är större än i den bärande riktningen.

En annan konstruktionstyp som visar detta fenomen tydligt är kortare platttribroar. Här finns ofta mer liggande armering i tvärläng (lastfördelande sekundär riktning, t.ex. valvet eller rambenets liggande armering) än i längsled (bärande primär riktning).

3.3.1 Krav på sprickbegränsning

Redan i tidiga betongnormer, tex. B7 från 1968 anges krav på tillåtna sprickbredder och minimiarmering. Krav på sprickbredden har sedan nyanserats, t.ex. med införandet av miljöklasser i BBK94 och exponeringsklasser i BBK04. Idag bestäms sprickbreddskravet huvudsakligen av projekterad livslängd, vattencementtal, bindemedelsammansättning och exponeringsklass.

Sprickbredden i B7 anges till $w_k=0,3\text{mm}$ för permanenta laster för vanliga konstruktioner och $w_k=0,2\text{mm}$ för vattentäta konstruktioner. Dessa värden används i princip fortfarande med vissa undantag (för vattentäta konstruktioner har sprickbredden t.ex. varierat mellan 0,1 och 0,2mm).

Det som främst skiljer sig över tid är modelleringssätt och hanterande av tvång. Tidigare har systemen betraktats som 2-dimensionella, dvs endast bärande primär riktning har analyserats. Sekundärriktning armerades enligt schablonregler. Nu modellerar man nästan alltid i 3D FEM varvid båda riktningarna analyseras. Detta ger höga teoretiska armeringsbehov på alla ställen där det finns diskontinuiteter, t.ex. då 2 byggdelar möts. Tvång har i 2-dimensionella system modellerats som en elastisk töjning, dvs en extern last. Samma modellering i 3-D ger mycket höga laster i sekundärriktningen (som är styvare). Det finns alternativa sätt och rekommendationer att modellera tvång, men inget av dessa erbjuder en *heltäckande* och allmänt accepterad lösning och alla medför ett betydande merarbete. Resultatet är att konstruktören kan välja att armera direkt på basis av utdata (med höga armeringsmängder som resultat) eller att lägga ner betydligt mer tid på efterbearbetning (*postprocessing*) med (enligt intervjustudien) risk för problem i granskningsprocessen (men med mindre armeringsmängder som resultat).

3.3.2 Krav på minimiarmering

Minimiarmeringen bestäms idag huvudsakligen av bygghedens tjocklek, betonghållfasthet och eventuellt tillämpad sprickbredds begränsning för tvång.

Redan i B7⁶ från 1968 angavs minimikrav som en andel armeringsprocent beroende på betongens och armeringens hållfasthet. I BBK04 förfinades konceptet genom införandet av en effektiv betongarea, ett yt nära betongområde som bestäms av täckande betongskikt och armeringsdiameter (detta medför också att bygghedens tjocklek har liten betydelse). Tanken är att dragkraften som finns i betongens effektiva yta precis innan uppsprickning ska kunna tas upp av minimiarmeringen. Eurokoden anknyter till denna metodik, men använder hela den dragta tvärsnittsytan (dvs. inte en effektiv betongarea). I stället införs två koefficienter som avses beakta ojämn spänningsfördelning. Eurokoden ger även möjligheten att begränsa sprickbredden pga. tvång genom att välja en mindre tillåten påkänning i armeringen.

Vid övergången från BBK04 till Eurokod 2 (SS-EN 1992-1-1:2005) tillkom en delvis markant ökning av nödvändig minimiarmering. Reglerna i Eurokoden är inte kalibrerade för tvärsnitt tjockare än ca 800 mm. Detta har stora konsekvenser för anläggningskonstruktioner (tunnlar har vanligtvis dimensioner mellan 800 och 2000mm).

I Energiforskrapport 2016:309 (Andersson et al. 2016) utfördes en jämförande beräkning av reglerna enligt BBK04 och Eurokod och jämförelser med internationella regelverk och praxis. Denna visade en *mycket kraftig* variation av armeringsmängden beroende på använt regelverk och att beräkningen enligt Eurokod kan ge upp till 7 ggr större armeringsmängd än BBK04 (för i broar och tunnlar förekommande tjocklekar).

3.3.3 Krav på täckskikt

Krav på täckskiktstjocklek sätts av olika skäl som krav på förankringskapacitet och risk för korrosion orsakad av klorider eller karbonatisering. Regler som rör krav på täckskikt har förändrats signifikant över tid främst med fokus på skydd mot korrosion. Minimikrav i detta avseende beror generellt på typ av miljö, betongkvalitet och under senare tid livslängdsklass.

Det kan vara intressant att se hur typiska täckskiktskrav för broars överbyggnad har varierat över tid. I B7 från 1968 angavs minimivärdet 20 mm för väggar och plattor med hänsyn till korrosion. För konstruktioner med armeringsdiameter större än 17 mm krävdes högre värden än detta med tanke på förankringskapacitet.

Om man går till kraven i BBK 1994 och BRO 94 är det allmänna kravet på täckskikt 55 mm i livslängdsklass L2 (100 år), vilket är signifikant högre än tidigare krav. I nuvarande system definierat i Boverkets konstruktionsregler EKS 12 är motsvarande krav 40-45 mm kopplat till strikta krav på vattencementtal hos betongen.

Generellt sett har alltså kraven på täckskikt ökat över tid främst motiverat av korrosionsskydd. Denna ökning har enbart marginell direkt effekt på mängden betong, men ger en indirekt effekt genom att täckskiktet ingår som en parameter i olika formler för beräkning av sprickvidd. Detta ger en särskilt stor effekt i konstruktioner som uppfördes under den tid som BBK tillämpades. Man får

⁶ B7 (1968) Bestämmelser för betongkonstruktioner. Allmänna konstruktionsbestämmelser: Statens betongkommitté, Stockholm 1969

också en indirekt inverkan i de fall man kopplar krav på minimiarmering till sprickviddskrav, vilket leder till mer armering.

3.3.4 Sammanfattning

Krav kopplade till beständighet rörande sprickvidder, minimiarmering, täckskikt och betongkvalitet har förändrats över tid liksom metoderna för att beräkna sprickvidder med empiriska formler. Det är svårt att bedöma de praktiska konsekvenserna av dessa förändringar eftersom de interagerar på ett komplext sätt.

Det som förefaller ha störst effekt på materialmängder är de nuvarande reglerna för minimiarmering som är svårtolkade och baserade på empiriska formler som kan ge orimliga resultat när de skalas upp till dimensioner som är aktuella för broar och tunnlar. Detta är ofta aktuellt i konstruktionens tvärlöd (icke-bärande riktning) där kravet på minimiarmeringen dominerar. I detta avseende är särskilt ”känsliga” konstruktioner korta plattrambroar och tunnlar under grundvatten, där det är inte ovanligt att det finns nästan lika mycket armering i icke-bärande riktning som i bärande riktning.

Idag dominerande analys med 3D FEM ger också upphov till sekundära påkänningar som kopplade till sprickviddskrav ger behov av extra armering. En viktig fråga här är om krav på täckskikt och sprickvidder för stora delar av en bro alltför ofta hänförs till en alltför hög exponeringsklass. Man kan exempelvis ifrågasätta om hela överbyggnaden bör hänföras till den idag högsta klassen XD3 för kloridkorrosion.

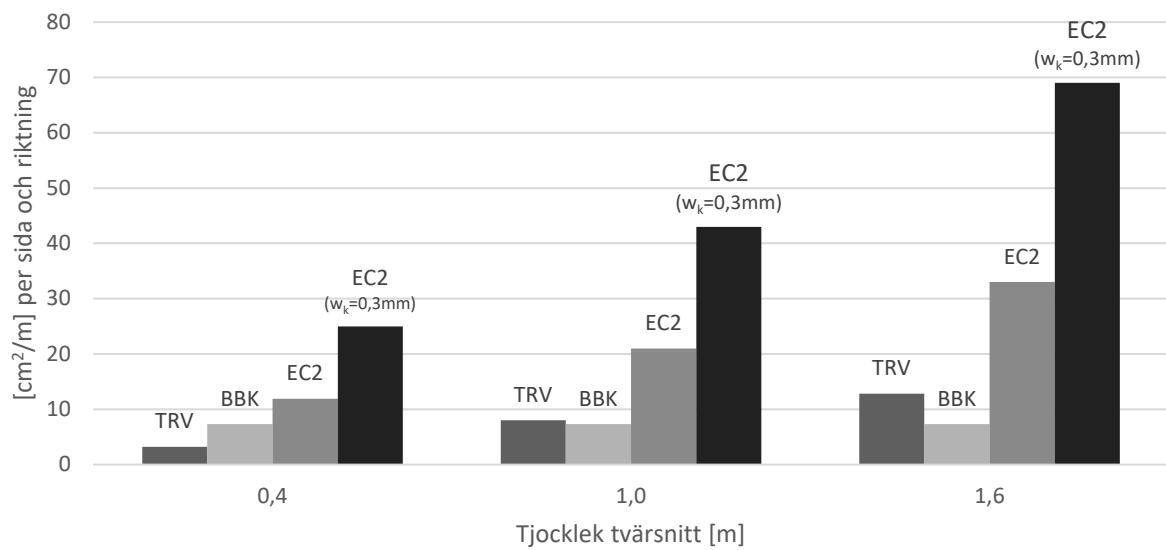
Generellt finns det behov av en djupgående analys av de praktiska konsekvenserna för materialförbrukningen i verkliga konstruktioner av den stora uppsättning regler av olika slag som tillämpas idag för armerade betongkonstruktioner. En sådan analys bör bl.a. grundas på systematiska undersökningar av äldre verkliga konstruktioner för att undersöka vilka krav som faktiskt uppfyller sitt syfte.

Innan införandet av Eurokoderna var det praxis i Sverige inom anläggningskonstruktion att tillämpa Trafikverkets schablonkrav på minimiarmering. Reglerna enligt BBK användes endast om det fanns stora osäkerheter kring tvång. Trafikverkets krav, som fortfarande används, är lättanvända och resulterar i relativt låga mängder minimiarmering.

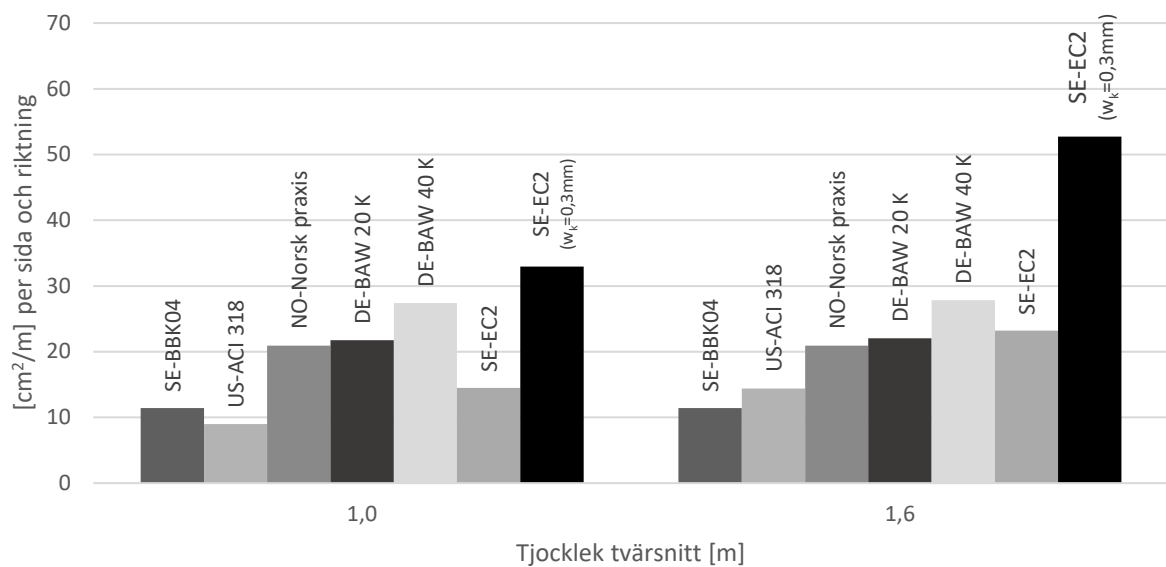
I Figur 3.2 redovisas minimiarmering enligt olika svenska regelverk för byggdelar med vanligt förekommande tvärsnittsdimensioner hos anläggningskonstruktioner⁷. Vi ser en kraftig ökning av armeringsbehovet i senare normgenerationer. I Figur 3.3 jämförs minimiarmering enligt svenska regelverk med det som är praxis i Tyskland, Norge och USA. Det är uppenbart att variationen är hög och det kan troligen förklaras med att det är nästintill omöjligt att verifiera minimiarmering för sprickbreddsbegränsning i försök. Istället baseras modellen på teoretiska antagande och icke-linjära FE-analyser.

I den tidigare hänvisade Energiforskrapporten (Andersson et al. 2016) behandlas bl.a. minimiarmering för betongdammar, dvs en annan konstruktionstyp som kräver tjocka tvärsnitt. I rapporten utförs icke-linjära FE-beräkningar och utifrån resultaten ges en rekommendation för en övre gräns för minimiarmering. En liknande stark rekommendation, t.ex. från Trafikverket och andra stora beställare, hade varit ett värdefullt bidrag till rimlig tolkning av regelverket.

⁷ Exemplet är ett 1 m brett C35/45 betongelement med Ø16 K500 B/C armering, se bilaga B.5.



Figur 3.2. Minimiarmering, svenska regelverk för dragda byggdelar; regelverk som jämförs är TRV: befintliga krav från Trafikverket (och även tidigare Banverket och Vägverket), BBK: Boverkets tidigare byggregler för konstruktioner (BBK04); EC2: Eurokod 2 (SS-EN 1992-1-1:2005). Se bilaga B.5.



Figur 3.3. Minimiarmering enligt internationella regelverk för dragda byggdelar (enligt data från Andersson et al. 2016).

4 Förändringar av projekteringsarbetet under 50 år

4.1 Allmänt

Mycket stora förändringar av ingenjörskapet har skett under de senaste 50 åren. Det gäller utvecklingen inom både *ingenjörsvetenskap* och *ingenjörskonst*. Följande är en direkt översättning från de engelska begreppen *engineering science* och *engineering design* (Addis 1990) till svenska⁸:

Ingenjörsvetenskap har som mål att förstå och förklara världen, vilket innebär att använda teorier för att förklara observerade fenomen och att genomföra kontrollerade laboratorieexperiment för att testa hypoteser. Ingenjörskonst handlar å andra sidan främst om produktion av artefakter under förhållanden som är mycket mindre kontrollerade än i laboratoriet och med mycket större osäkerhet.

I detta avsnitt fokuserar vi på ingenjörskonst, som kopplas till det som ingenjören gör i sitt dagliga arbete utifrån de osäkerheter och förutsättningar som finns (Vincenti 1990, Koen 2003, Davis 2012). Framöver använder vi begreppet projekteringsarbete för att beskriva detta mer specifikt i förhållande till skapande av byggnadsverk. Kort sagt handlar det om att bestämma vad som ska byggas och förbereda de instruktioner som är nödvändiga för att bygga det. Detta innebär en beslutsprocess under osäkerheter (*decision making under uncertainty*), varvid en rad ofta motstridiga mål måste beaktas, innefattande funktion, ekonomi, säkerhet och hållbarhet.

För att identifiera viktiga utvecklingstendenser i projekteringsarbetet de senaste 50 åren sammanfattas input från intervjuer med specialister i anläggningsbranschen samt från en industriworkshop, se bilagor E och F. Utvecklingen enligt dessa källor kan sammanfattas i nedanstående korta punkter:

- Regelverk och normer har närmast exploderat och blivit alltmer detaljerade och oöverskådliga, vilket går ut över möjligheten att hitta effektiva och innovativa lösningar.
- Användning av avancerade tredimensionella analyser av konstruktioner kombinerat med lastfall, randvillkor och krav intrimmade mot enklare balkmodeller leder ofta till orimliga mängder armering.
- Inflation i utbildningsnivå och starkt ökad specialisering har medfört att kompetenta personer med helikopterperspektiv saknas. Detta leder till alltmer administration och allt mindre värdeskapande insatser.
- Granskning från beställare har ofta fokus på detaljregler och för att undvika stopp i processen finns en tendens mot mer konservativa lösningar.
- Förr kunde ingenjörer skryta om låga nyckeltal som kg armering per m² broyta, men numera saknas ofta incitament att reducera mängderna.
- Beställare har monterat ner sin egen kompetens vilket leder till allt fler improduktiva möten och allt mindre värdeskapande arbete.

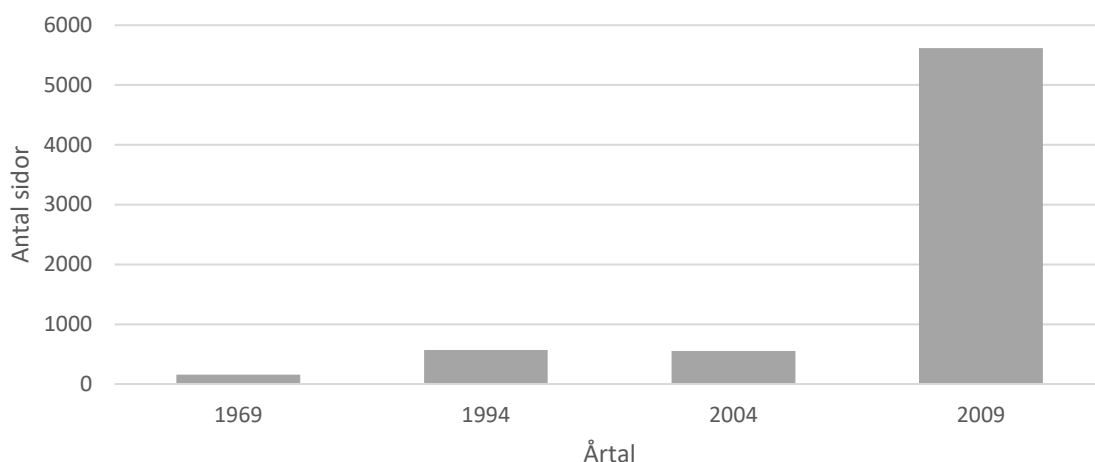
⁸ Original på engelska: "Engineering science has aims ... [of] understanding and explaining the world ... [making] use of theories to explain observed phenomena and involve[ing] controlled laboratory experimentation in testing hypotheses. Engineering design, on the other hand, is concerned primarily with the production of artefacts in conditions much less under control than those of the laboratory and with much less complete data." Addis (1990, s. 36)

- Upphandlingar med orealistiska och alltför låga priser accepteras, vilket leder till problem i senare skeden.
- Ändrad relation mellan arbets- och materialkostnader leder till enkla och rejäla geometrier, med ökade mängder som följd.
- Projekteringen tar idag mycket längre tid med mer beräkningar, utan att man får bättre konstruktioner för dyrare insatser.
- Potentialen att reducera mängder ligger i tidiga skeden, men utformning och materialförbrukning väger lätt i tidiga planeringsfaser

Nedan belyser vi mer i detalj några företeelser som är särskilt betydelsefulla för tendenser till ökade mängder i byggandet.

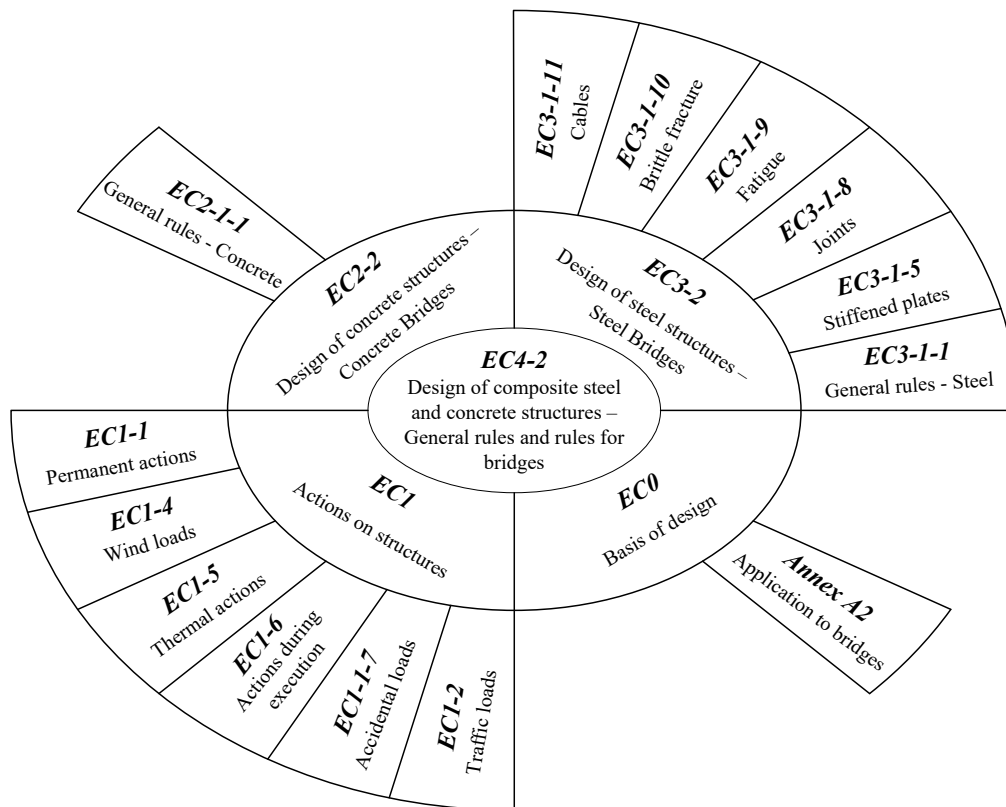
4.2 Ökad omfattning av detaljregler och ökad komplexitet

Den ökade mängden detaljregler kan grovt illustreras genom antalet sidor som finns i regelverket. Figur 4.1 visar antalet sidor i normer som har relevans för projektering av vägbroar från 1969 till 2009, då Eurokoderna implementerades i Sverige, se Bygginnovationen (2010). Vi kan se att antalet sidor ökat från 155 år 1969 till ca 5600 år 2011, dvs med en faktor 36. Tidigare undersökningar har även lyft fram att införandet av Eurokoderna har i Sverige ökat byggkostnader där den relativa ökningen av projekteringskostnader var högst (SBUF 2015). Allt detta förstärker slutsatsen att införandet av Eurokod är den mest avgörande faktorn för utvecklingen.



Figur 4.1 Förändring över tid av antal sidor normregler med relevans för projektering av vägbroar, baserat på data från Bygginnovationen (2010). OBS att antal sidor för Eurokod (2009) har uppdaterats.

Ett mer specifikt exempel på denna inflation av regler visas i Figur 4.2 av vilken framgår att man idag behöver tillgång till totalt ca 1500 sidor från Eurokod enbart för att projektera överbyggnaden av en samverkansbro i stål och betong.



Figur 4.2. Eurokoddokument relevanta för projektering av överbyggnaden till en samverkansbro, totalt ca 1500 sidor.

I såväl intervjustudien som vid industriworkshopen betonade man att förr hade man översiktliga och kortfattade konstruktionsregler och att man arbetade med enkla och överskådliga beräkningsmodeller. Allting kunde inte kvantifieras och beräknas och som ingenjör behövde man utnyttja sin erfarenhet. Konceptuell helhetsbedömning var en mycket viktig del av beslutsprocessen. Nu måste man förhålla sig till en uppsjö av regler som ofta beskrivs med hjälp av formler, som ger binära svar av typen OK eller INTE OK. Utöver att krav av den typen leder till allt mer omfattande regelverk ökar komplexiteten (Angelino et al. 2014, Björnsson 2016).

Shapiro (1997) lyfte fram att ett viktigt syfte för regelverk (*standards of practice*) är att kontrollera risker samt säkerställa för samhället att detta görs på ett tillfredställande sätt. Coekelbergh (2006) nämnde två alternativa tillvägagångssätt för att uppnå detta mål: (1) genom att införa externa kontroller eller (2) framkalla ingenjörens känsla av ansvar och respektera dennes autonomi. Med många preskriptiva regler ger regelverken prioritet till det första alternativet. Risker är då att ingenjören inte känner sig skyldig att ta ansvar för sina beslut eftersom man bara behöver följa de bestämmelser som fastställts i regelverket (Coekelbergh 2006, Björnsson 2016). I praktiken innebär detta att även ingenjörens kreativitet och ingenjörsmässiga omdöme i problemlösning kan hämmas. Detta har långtgående konsekvenser med tanke på att det finns vissa typer av kunskap som används av ingenjören som inte kan kodifieras (Addis 1990, Vincenti 1990, Ferguson 1992, Shapiro 1997, Vick 2002, Davis 2012).

En annan aspekt som ofta nämndes i intervjuerna är att konceptuell förståelse har nedprioriterats och beslutsunderlag i form av siffrvärden övervärderas kraftigt. Detta speglar en generell tendens i samhället att värdera det som går att kvantifiera högre än det som inte går att kvantifiera, dvs det

finns en *quantification bias*⁹ (se t.ex. Maiers 2018). Förmågan för ingenjörer att kvalitativt bedöma osäkerheter och fatta välavvägda beslut är väldigt viktig men kan anses ha försämrats över tid.

Denna utveckling mot många preskriptiva krav har i hög utsträckning skapats av akademisk forskning på området som lett till att alltmer komplexa samband implementerats i regelverket. Detta illustreras av ett enkelt exempel, se Figur 4.3. Figuren återger de formler som finns i Eurokod 3 (SS-EN 1993-1-1:2005, kapitel 6.3.3) för beräkning av en enkel stålpelare belastad i tryck kombinerat med böjning. För 50 år sedan kunde en sådan pelare dimensioneras för hand och beräkningen redovisas på mindre än en A4-sida, samtidigt som att metoden var betydligt enklare att förstå. Skillnaden i precision mot dagens metodik rör sig om ett fåtal procentenheter. I vissa normer har man förhållit sig till en s.k. *levels-of-approximation* approach som innebär att även förenklade metoder tillåts där en ökad grad av precision erhålls vid användning av mer sofistikerade (men komplexa och tidskrävande) metoder (Muttoni & Ruiz 2012). Å andra sidan är det väldigt osäkert om en ökad grad av sofistikation är kostnadseffektiv om man räknar in den ökade tiden som behövs.

Bakgrunden till regler och formler som tillämpas är ofta svårbegriplig och ibland helt okänd. Här kan man se en brist i våra utbildningar där ingenjörsstudenter inte tränas att förstå bakgrunden till de metoder som man senare kommer att använda i skarpt läge. I fall där det råder osäkerheter vid beslutstagande finns därför en tendens att man letar upp den regel som är mest konservativ och tillämpar den utan att riktigt förstå varför. Man kan då inte säga att man gjort fel vid eventuell granskning. Men ett sådant beteende leder ofta till onödigt överutnyttjande av resurser.

⁹ Andra begrepp som beskriver samma sak är *McNamara fallacy* eller *quantitative fallacy*

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} \leq 1$$

Interaktions-faktorer	Dimensioneringsföresättningar	
	elastiska tvärsnittsstorheter tvärsnitt i klass 3, tvärsnitt i klass 4	plastiska tvärsnittsstorheter tvärsnitt i klass 1, tvärsnitt i klass 2
k_{yy}	$C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}$	$C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \frac{1}{C_{yy}}$
k_{yz}	$C_{mz} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}$	$C_{mz} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \frac{1}{C_{yz}} 0,6 \sqrt{\frac{w_z}{w_y}}$
k_{zy}	$C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}$	$C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \frac{1}{C_{zy}} 0,6 \sqrt{\frac{w_y}{w_z}}$
k_{zz}	$C_{mz} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}$	$C_{mz} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \frac{1}{C_{zz}}$
Hjälpfunktioner:		
$\mu_y = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}{1 - \chi_y \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}$ $\mu_z = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}{1 - \chi_z \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}$ $w_y = \frac{W_{pl,y}}{W_{el,y}} \leq 1,5$ $w_z = \frac{W_{pl,z}}{W_{el,z}} \leq 1,5$ $n_{pl} = \frac{N_{Ed}}{N_{Rk} / \gamma_{M1}}$ C_{my} se tabell A.2 $a_{LT} = 1 - \frac{I_T}{I_y} \geq 0$	$C_{yy} = 1 + (w_y - 1) \left[\left(2 - \frac{16}{w_y} C_{my}^2 \bar{\lambda}_{max} - \frac{16}{w_y} C_{my}^2 \bar{\lambda}_{max}^2 \right) n_{pl} - b_{LT} \right] \geq \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$ med $b_{LT} = 0,5 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0^2}{\chi_{LT}} \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,Rd}}$ $C_{yz} = 1 + (w_z - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{C_{mz}^2 \bar{\lambda}_{max}^2}{w_z^5} \right) n_{pl} - c_{LT} \right] \geq 0,6 \sqrt{\frac{w_z}{w_y}} \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}}$ med $c_{LT} = 10 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0^2}{5 + \bar{\lambda}_z^4} \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \chi_{LT} M_{pl,y,Rd}}$ $C_{zy} = 1 + (w_y - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{C_{my}^2 \bar{\lambda}_{max}^2}{w_y^5} \right) n_{pl} - d_{LT} \right] \geq 0,6 \sqrt{\frac{w_y}{w_z}} \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$ med $d_{LT} = 2 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0}{0,1 + \bar{\lambda}_z^4} \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \chi_{LT} M_{pl,y,Rd}} \frac{M_{z,Ed}}{C_{mz} M_{pl,z,Rd}}$ $C_{zz} = 1 + (w_z - 1) \left[\left(2 - \frac{16}{w_z} C_{mz}^2 \bar{\lambda}_{max} - \frac{16}{w_z} C_{mz}^2 \bar{\lambda}_{max}^2 \right) n_{pl} - e_{LT} \right] \geq \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}}$ med $e_{LT} = 1,7 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0}{0,1 + \bar{\lambda}_z^4} \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \chi_{LT} M_{pl,y,Rd}}$	

Figur 4.3. Formler för dimensionering av stålpelare vid kombination mellan tryck och böjning (från SS-EN 1993-1-1:2005)

4.3 Ökad användning av datorbaserade analyser – konsekvenser

En annan viktig utveckling det senaste 50 åren är trenden mot ökad digitalisering. För projekteringsarbete inom anläggningsbyggandet är två viktiga utvecklingslinjer ökad användning av avancerade datorbaserade analyser (dvs 3D FE-beräkningar) samt modellbaserad projektering genom BIM (Building Information Modeling) (Björnsson 2022). I detta avsnitt fokuserar vi på första punkten.

Datorbaserade analyser har blivit standard inom industrin där mer komplexa tre-dimensionella modeller de senaste decennierna har ersatt enklare två-dimensionella modeller. Genom förfinade datormodeller har det blivit möjligt att analysera i stort sett alla typer av strukturer, med förmåga att fånga mycket intrikata mekanismer och beteenden. Digitaliseringen har även inneburit möjligheten att automatisera och parametrisera beräkningar. Ofta beskrivs dessa utvecklingar mycket positivt.

Men det är viktigt att beakta de negativa konsekvenserna av denna typ av utveckling för projekteringsarbete. I tidigare avsnitt lyftes fram att konstruktionsreglerna blivit alltmer komplexa och omfattande. Om dessutom konstruktörernas verktyg ökar i komplexitetsgrad, vad innebär detta för själva ingenjören?

En konsekvens av ökad användning av datorbaserade analyser är den tid som ägnas åt att skapa, verifiera och utvärdera konstruktionsberäkningar. I Turell & Tengvall (2024) jämfördes beräkningsrapporter tagna från två olika plattrambroar där en som byggdes 1978 hade totalt 39 sidor jämfört med en liknande som byggdes 2023 som hade 856 sidor. Det är en ökning med faktor mer än 20.

Utöver en ökad tidsåtgång kan avancerade datorbaserade analyser medföra en risk för mänskliga fel (*black box effect*) (Borthwick et al. 2012, MacLeod 2016, Björnsson et al. 2016, Björnsson 2022). I intervjustudien lyftes även fram att feltolkningar och bristande kontroller vid modellering kan leda till ökade resursåtgång (se även avsnitt 4.3.1). För att motverka detta har behovet av sund konceptuell förståelse samt användning av enklare handberäkningsmetoder betonats (t.ex. *back-of-the-envelope* handberäkningar för att verifiera utdata från en avancerad beräkningsmodell).

Sedan införandet av Eurokoden kräver Trafikverket att byggnadsverkets verkningssätt i sin helhet ska beaktas i dimensioneringen (TRVINFRA-00227, kapitel 7.1.1). Detta medför att 3D-analyser görs som standard för en stor andel konstruktioner. En svårighet med detta som lyfts fram genom intervjuerna är att det försvårar möjligheterna att optimera. Att analyserna är så detaljerade innebär bl.a. att en optimering på konceptuell nivå inte fungerar utan fokus blir istället på suboptimering. Samtidigt kan det behövas speciell kunskap om hur man undviker *konstiga resultat* som uppkommer pga t.ex. tvång. I följande avsnitt belyser vi närmare dessa svårigheter genom att utvärdera konsekvenserna av olika modelleringsbeslut vid beräkning av en enkel plattrambro.

4.3.1 Konsekvenser av modelleringsbeslut vid beräkning av en plattrambro

Tidigare i rapporten har vi visat en ökning av materialåtgång för just plattrambroar. I en av fallstudierna var feltolkning och bristande kontroll av 3D modell en huvudorsak till ökad materialåtgång. Den generella frågan som lyfts fram i detta avsnitt är huruvida användning av 3D-analys kan kopplas till en ökad resursförbrukning.

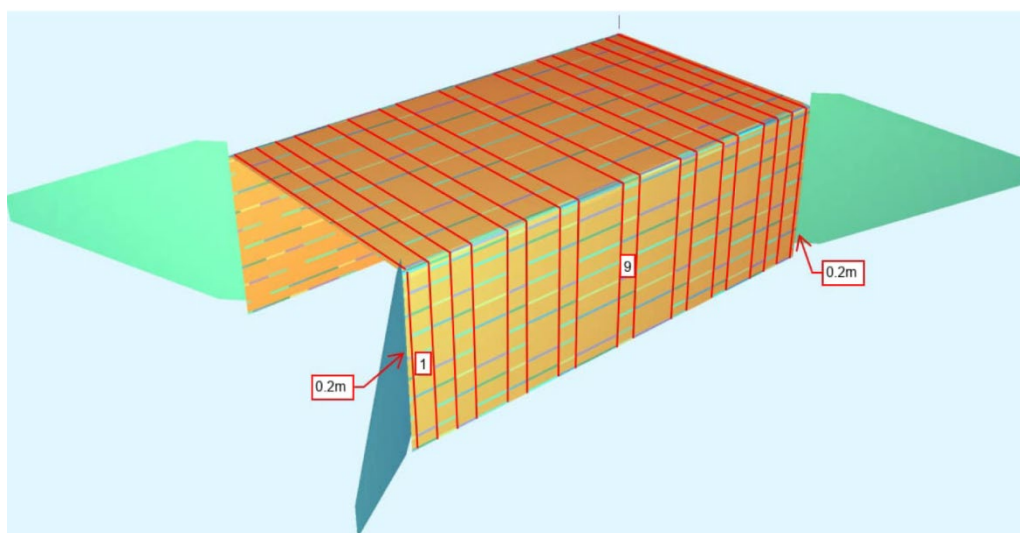
Inom projektet utfördes en detaljerad analys av en plattrambro, vilken redovisas mer utförligt i bilaga C. Analysen bygger på en verklig bro som konstruerades och byggdes 2020 och har som mål

att jämföra den mängd armering som erhålls utifrån olika modelleringsbeslut. Den befintliga bron analyserades med en 3D modell (se bilaga C).

De alternativa modelleringssätt som studerades var:

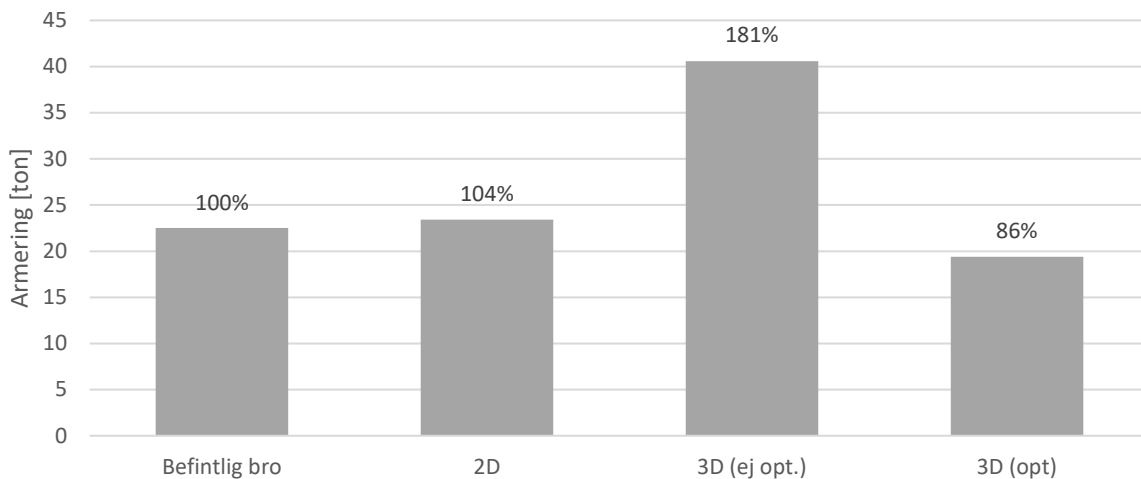
1. 2D-analys
2. 3D-analys med låg fokus på optimering
3. 3D-analys med hög fokus på optimering

I 2D-analysen gjordes en enklare rammodell baserade på en metersstrimla. 3D modellen visas i Figur 4.4 för fallet där hög fokus var på optimering, där de röda linjerna avgränsar de strimlor som användes för att lägga in armering. Den andra 3D-analysen med låg fokus på optimering baserades på ett snitt nära brons kant (vilket motsvarar *worst-case* för snittkrafter i brons bärriktning). Denna modell (nr 2) valdes för att illustrera potentiell ökning av armeringsmängd och visa på behovet av efterbearbetning som krävs för att åstadkomma materialbesparing.



Figur 4.4. Datormodell av plattrambro med strimlor som behöver analyseras för en högt optimerad 3D-analys

Figur 4.5 redovisar resulterande armeringsmängder från de alternativa analyserna jämfört med den verkligt byggda bron. Det framgår att en enkel 2D-analys och mer komplex 3D-analys kan ge likvärdiga armeringsmängder. En extremt optimerad 3D-analys som inte är produktionsanpassad kan även ge något mindre armering.



Figur 4.5 Armeringsbehov för plattrambro (siffran ovanför visar skillnad mot befintlig bro)

Resultaten visar också att en 3D-analys utan kvalificerad efterbearbetning kan ge signifikant ökad mängd armering (81% mer i detta fall). Intervjupersoner vittnar om att den typen av analys inte är ovanlig i praktiken.

3D-analys kan uppfattas ha en högre noggrannhet, som dock i stor utsträckning är skenbar eftersom föreskrivna laster som används som indata är idealiserade, schematiska och i många fall grovt uppskattade. Ett tydligt exempel på detta är laster från tvång genom temperaturdifferenser föreskrivna i normer, se Gottsäter (2019). Detsamma gäller i viss mån för trafiklaster av olika slag.

Hantering av tvång och optimering är styrande faktorer för den slutgiltiga armeringen i bron. Hantering av tvång skapar omfattande extra arbete för konstruktören. Det finns förslag på hur tvång kan beaktas i konstruktionsprocessen, men konstruktören riskerar att få problem i granskningsprocessen när man reducerar tvånget.

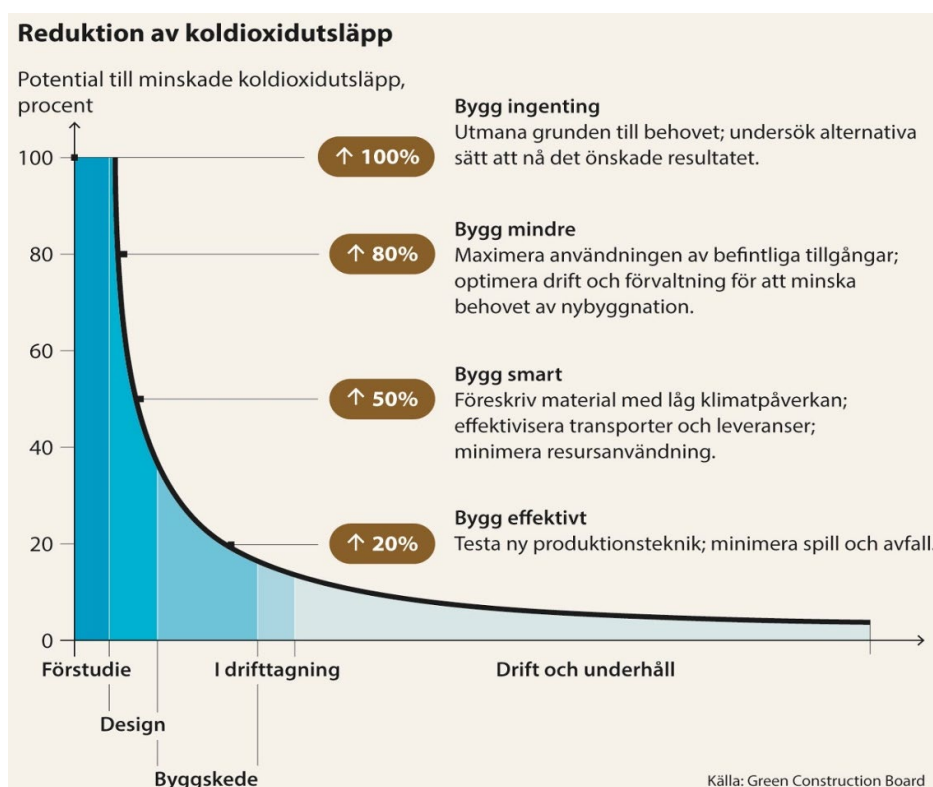
Optimeringen är dessutom väldigt tidskrävande och måste också ta hänsyn till produktionsanpassning av armeringsutformningen. Det kan lätt bli en fördubbling av arbetet. För att skapa en beteendeförändring krävs det ekonomiska incitament, t.ex. genom att sätta pris på CO₂-utsläpp.

5 Aspekter på byggprocessen

5.1 Bakgrund

I alla skeden av bygg- och förvaltningsprocessen tas beslut som berör ett byggnadsverks klimatpåverkan. Om klimatfrågan tas upp från projektets start och om berörda aktörer involveras tidigt i processen finns goda möjligheter att minska klimatpåverkan. Därför är byggherrens tidiga arbete särskilt viktigt. Då bestäms ambitioner och krav avseende klimatpåverkan.

Möjligheterna att påverka koldioxidutsläpp i olika skeden av plan- och byggprocessen beskrivs principiellt i Figur 5.1.



Figur 5.1. Potential till minskning av klimatpåverkan i olika skeden. Bild återgiven med tillstånd av Betongföreningen (2024)

Processen har utvecklats mot att fler krav ställs på den blivande anläggningen redan i tidiga skeden. Detta görs oftast utan att man för den skull utför detaljerade studier av det som ska byggas. Möjligheten att tekniskt detaljoptimera är liten under detta skede. Däremot skapas ofta lösningar som omöjliggör detta även i senare skeden. En viktig fråga är: när och på vilka underlag tas dom stora besluten och när skapas lösningarna?

I detta kapitel görs en genomgång av plan- och byggprocessens olika skeden med fokus på möjligheter att påverka material- och klimatavtryck.

5.2 Plan- och byggprocessen

Plan- och byggprocessen i anläggningsprojekt för t.ex. vägar och järnvägar kan enligt Trafikverket delas in i de moment som beskrivs i Tabell 5.1. De *tidiga planeringsskeden* 1-3 illustreras i Figur 5.2 för ett projektexempel som hämtats från Trafikverket. I dessa skeden hanteras hela väg- eller järnvägssträckor, och enskilda konstbyggnader utgör enbart delar av helheten. Efter dessa faser påbörjas *projekterings- och byggnationsskedet*, som omfattar punkterna 4-9. I detta skede hanteras en eller flera delar som ingår i projektet ofta separat och projekteras på detaljnivå. När anläggningen är klar vidtar *drift- och underhållsskedet* (punkt 10).

Tabell 5.1. Beskrivning av delmoment i plan- och byggprocessen för anläggningsprojekt.

Nr.	Delmoment	Kommentar
1	Åtgärdsvalsstudie ÅVS	Tidiga planeringsskeden
2	Väg-/järnvägsplan - Samrådsunderlag - Miljökonsekvensbeskrivning (MKB) och gestaltningsprogram - Val av lokaliseringsalternativ (enbart då olika korridorer skall utredas) - Tillåtlighetsprövning av regeringen (enbart vissa projekt) - Utformning av planförslag - Fastställelseprövning av Trafikverket	
3	Systemhandling (vid järnvägsprojekt, utförs parallellt med plan)	
4	Framtagande av förfrågningsunderlag (FFU)	Projekterings- och byggnationsskede
5	Upphandling	
6	Färdigprojektering	
7	Granskning	
8	Byggnation	
9	Överlämnande	
10	Drift och underhåll	Driftsskede



Figur 5.2. Exempel på tidiga planeringsskeden för ett järnvägsprojekt (Trafikverket 2021)

5.2.1 Tidiga skeden

Delmoment 1-3 som ingår i tidiga planeringsskeden enligt Tabell 5.1 beskrivs något mer detaljerat i Bilaga D. Dessa skeden tar i regel lång tid eftersom planläggning är en demokratisk process. Som tidigare nämnts är det viktigt att undvika låsningar i tidiga skeden som kan påverka byggkostnad och utsläpp negativt. Ju mindre material man bygger in desto lägre kostnader och CO₂-belastning

genereras av den färdiga anläggningen. För att uppnå detta måste man tidigt ha kunskap och medvetenhet om faktorer och förhållanden som kan leda till ökad resurs- och materialåtgång.

I tidiga skeden är huvudsyftet att få tillåtlighet och komma vidare med projektet. I processen upprättas:

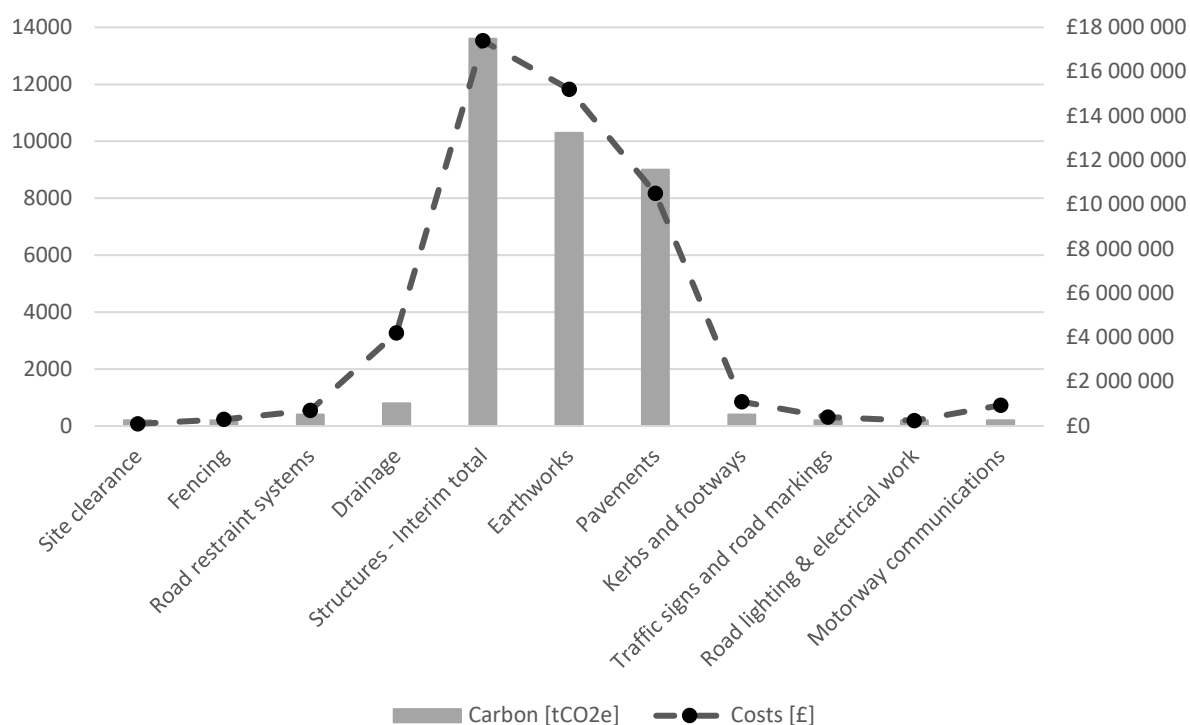
- Miljökonsekvensbeskrivning (MKB) som förankras med länsstyrelse med de lösningar detta innebär.
- Gestaltungsprogram, förankrat med berörda kommuner och sakägare, förhandlas och tas fram.
- Beskrivning av den framtida järnvägs- eller vägfastigheten och tillfälligt nyttjande som krävs för att kunna genomföra projektet.
- Samhällsekonomisk analys (SEA¹⁰). I denna ingår framtagande av kostnadskalkyl och klimatkalkyl.

För att uppfylla kraven i SEA krävs ett aktivt och offensivt ingenjörsarbete för att optimera anläggningen. I detta arbete borde ingå:

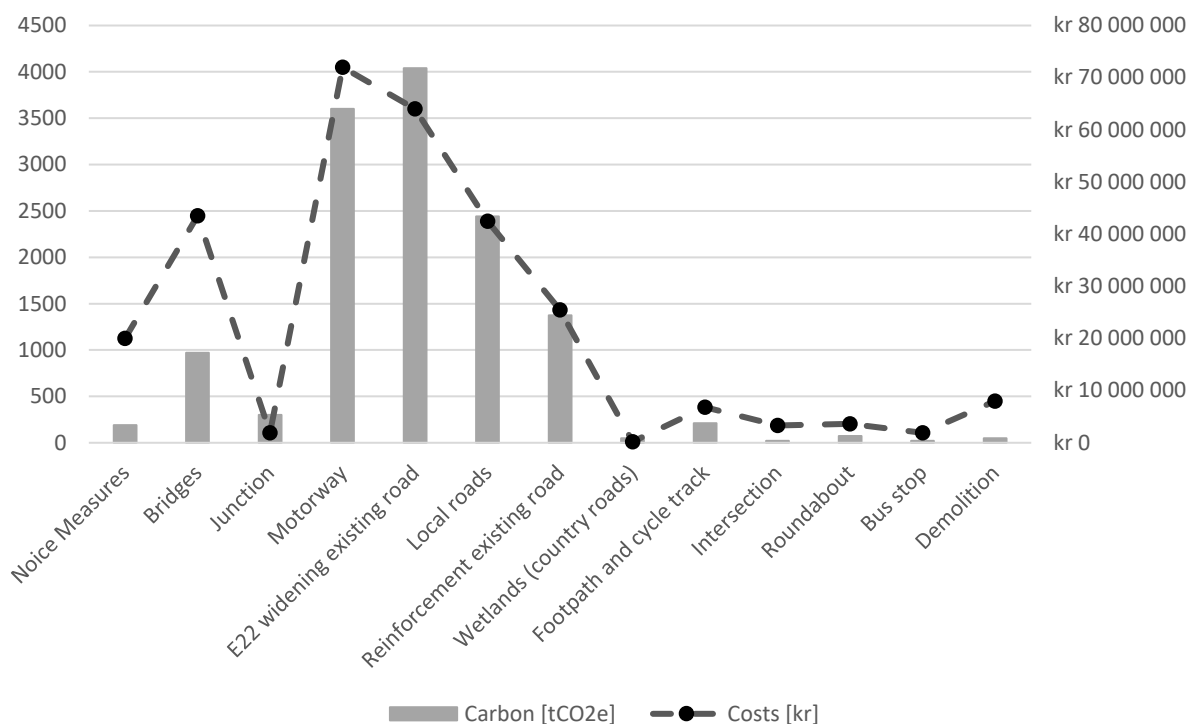
- Tillräckligt underlag för att identifiera de ingående delar som är alternativskiljande och har påverkan på CO₂-belastning och byggkostnad.
- Uppdaterade kvalitetssäkrade recept baserade på tidigare statistik och aktiv analys avseende konstbyggnader, jord- och bergarbete, geokonstruktioner och liknande.
- En analys av vilka delar som är kostnads- och utsläppsdrivande, så att detta kan prioriteras i plan- och projektarbetet.

Två exempel på byggprojekt där detta har ingått visas i Figur 5.3 och Figur 5.4. Den första är från Cross Tay Link, en högbro över floden Tay i England med kringanläggningar. Den andra är från E22 för breddning av 2+1 väg och ny 2+2 väg med 3 trafikplatser för vidare utvärdering och analys.

¹⁰ Trafikverket beskriver samhällsekonomisk analys på följande sätt (Trafikverket 2022): "Samhällsekonomisk analys (SEA) är en metod för utvärdering av användningen av samhällets begränsade resurser ur effektivitetssynpunkt. Eftersom vi har begränsad mängd resurser kan vi inte tillgodose alla behov som medborgarna i samhället har och inte göra allt som är önskvärt från samhällets sida"



Figur 5.3 Kostnader och koldioxidförbrukning för olika delar i anläggningsprojekt Cross Tay Link, UK (Barlow & Metaxas 2020).



Figur 5.4. Kostnader och koldioxidförbrukning för olika delar i anläggningsprojekt E22, Sverige (Barlow & Metaxas 2020).

Notera i Figur 5.4 hur förhållandet mellan inbyggd materialmängd, CO₂ -belastning och byggkostnad följer varandra, vilket bekräftar slutsatserna i avsnitt 1.1.

För att stödja materialbesparing i tidigare skeden bör regelverk, interna processer och praxis anpassas med till exempel:

- Tillräckliga arbetsområden för att kunna arbeta aktivt med masshantering och bearbetning av befintliga material.
- Regelverk som öppnar för användning av lokala material. I Tekniska Systemkrav Snabbjärnväg TSS som användes i Lokaliseringsutredning Lund-Hässleholm föreskrevs t.ex. bergkross i alla bankar som trafikeras av tåg helt utan att överväga kvalitetssäkrade eller stabiliserade jord- eller lerbankar utförda med lokala material. På sträckan råder inte bergöverskott.
- I granskningsprocessen av konstbyggnader och geokonstruktioner bör det generellt ingå rimlighetskontroll av ingående mängder, baserad på jämförelse med utvalda relevanta referensobjekt.
- Mer selektiv norm och granskningsprocess, dvs ställ inte samma krav på allt.
- Regelverk som i förlängningen borde baseras på väl dokumenterade erfarenheter.

Ingenjörsarbetet i tidiga skeden med mark- och konstruktionsbyggnader har en tendens att vara baserade på grova schabloner. Offensivt konstruktionsarbete eller kalkylarbete görs ofta inte i det skede där man riggar spelplanen för projektets genomförande.

Konsekvensen av detta är att plan- och genomförandebeslut ofta tas med trubbiga eller onödigt negativa underlag. Det uttalade målet bör i stället vara att göra så litet avtryck som möjligt både miljömässigt och finansiellt. Den planerade anläggningen ska vara:

- byggbar
- klara relevanta påverkningar
- finansierad inklusive projektreserv

Projektreserv hanteras med till exempel osäkerhetsbedömning och successivkalkylering.

Successivkalkylering är en modell där en grupp av erfarna experter tar fram en trolig bild av olika kostnadsposter i det planerade projektet, inklusive mått på osäkerheter. Man skattar då minimal, trolig och maximal kostnad för respektive post. Detta upprepas stegvis i planeringsprocessen. Trafikverket i Sverige använder sedan början av 00-talet denna metodik i alla projekt över 100 Mkr. Flera intervjuade experter vittnar om positiva erfarenheter av detta arbetssätt.

Det är viktigt att bryta den historiska trenden med ökade mängder och kostnader som vi har påvisat i den här rapporten. Om man ska lyckas med detta måste man påbörja arbetet redan i de tidiga skedena och fortsätta i samma riktning i senare skeden.

5.2.2 Projekterings- och byggnationsskede

Detta huvudskede omfattar punkterna 4-9 i Tabell 5.1. Här läggs fokus på framtagning av förfrågningsunderlag (FFU), som är ett mycket viktigt steg, eftersom det skapar spelregler för projektering och arbetsberedning. Andra aspekter på projektering och byggnation behandlas utförligt i övriga delar av denna rapport.

Förfrågningsunderlaget används vid upphandling och ingenjörsarbetet ser olika ut beroende på entreprenadform. Exempel på entreprenadformer är:

- Utförandeentreprenad
- Totalentreprenad
- Samverkansentreprenad

Dessa varianter diskuteras kortfattat nedan med fokus på möjligheter till minimering av resursförbrukning. Användning av specifikt industriellt byggandet diskuteras också som en möjlighet. Framställningen i nästa delavsnitt bygger på erfarenheter hos projektets arbetsgrupp samt synpunkter inhämtade via intervjuundersökningen.

5.2.2.1 Utförandeentreprenad

En utförandeentreprenad är en entreprenad där beställaren svarar för projekteringen och entreprenören ansvarar för att utförandet görs i enlighet med av instruktioner som tillhandahålls av beställaren. I en utförandeentreprenad är det beställaren som ingår avtal med eventuella konsulter.

I utförandeentreprenaden ställs stora krav på beställarens (egentligen dennes projektörs) förmåga att optimera utformningen, som skall omfatta färdiga byggbara arbetshandlingar inklusive t.ex. armeringsspecifikationer och arbetsberedning.

Den av offentliga myndigheter använda modellen för upphandling av konsulter och genomförande av projekteringar saknar idag väsentliga incitament för att minimera resursanvändning. Man upphandlar till stor del på fasta priser där billigast vinner. Om vinnaren kan leverera godkända handlingar i enlighet med gällande kravdokument för det låga priset är alla nöjda. Risken för suboptimering är stor om handlingar baseras på ofullständigt underlag.

5.2.2.2 Totalentreprenad

Detta är en entreprenadform där entreprenören ansvarar för såväl projektering som utförande av arbetena. Entreprenören skall ansvara för att objektet uppfyller avtalad funktion.

I totalentreprenaden tar entreprenören fram bygghandlingar baserade på gestaltningsprogram och i FFU upprättade handlingar, som redovisar funktion, mått och markintrång. Förslagshandlingar som tas fram i tidiga skeden kan ge onödiga låsningar och för att undvika detta borde man införa toleranser med max och minimimått för att möjliggöra resursoptimering i totalentreprenörens framtagning av bygghandlingar. Kanske måste viss efterjustering av ingångna avtal och kompensationer till markägare och andra berörda behövas.

Om det finns tid och frihetsgrader och om det är upphandlingstekniskt möjligt kan man utföra broar och stödkonstruktioner som totalentreprenader, vilket innebär att man konkurrensutsätter mängderna i förfrågan och därmed ökar sannolikheten att få en material- och produktionsoptimerad produkt.

5.2.2.3 Samverkansentreprenad

En samverkansentreprenad är egentligen inte en entreprenadform, utan en affärsform som syftar till att förbättra förutsättningarna för samarbete mellan byggherre och entreprenör. Samverkan kan ske i såväl en totalentreprenad (ABT) som en utförandeentreprenad (AB) i kombination med upphandlingsformer och ersättningsformer som ökar förutsättningen för samarbete mellan parterna. Vanligast är att samverkan sker inom ramen för en totalentreprenad som sträcker sig från projektering till slutförande. En viktig förutsättning är att skapa fungerande samarbetsformer mellan byggherre och entreprenör för att uppnå ett effektivt genomförande av projektet. Det handlar om

att skapa en organisation där kommunikation och beslutsfattande fungerar väl och där det lämnas utrymme för flexibilitet. Det innebär ofta en transparent och öppen dialog kring bland annat kostnader, risker och planering.

För att möjliggöra optimeringsarbete i en totalentreprenad eller samverkansentreprenad krävs följande:

- gemensam målbild
- relevanta kvalitetssäkrade tekniska krav
- toleranser som medger justeringar
- tillräckligt arbetsområde för byggnationen, generös tolkning krävs
- tillräckligt med tid

I normala fall vid linjearbeten ligger konstbyggnaderna med tid för projektering, granskning och eventuell modifiering efter granskning på kritiska linjen för tidplanen, vilket riskerar att förlänga byggtiden med ökade kostnader som följd.

I intervjuer med experter påpekades av flera att ömsesidigt förtroende mellan kompetenta beställare och utförare är en viktig framgångsfaktor för ett lyckat projekt och hushållning med resurser.

5.2.2.4 Industriellt byggande

En definition av industriellt byggande här är att förprojekterade typer av konstbyggnader skall finnas tillgängliga för tillämpning i väg- eller järnvägsprojekt. Själva byggnationen kan utföras på plats.

Industriellt byggande har använts inom konstbyggnad både av SJ med fackverksbroar och på Banverkets tid med en Vägbro i tre fack för korsande vägar över järnväg. De senare togs fram efter initiativ av Banverket och användes bland annat i S200 projektet på 90-talet och producerades av tre företag. De slutade dock användas då de inte kunde verifieras för nya krav som tillkom senare.

I projekt Norrbotniabanan har man nyligen utvecklat ett koncept med en sluten rambro, en trefacksbro och en landskapsbro. Dessa typbroar skall i förväg vara projekterade, optimerade och dimensionerade för materialutnyttjande och mer effektiv produktion. I konceptet inkluderas formsystem anpassade till armering som går vidare till nästa enhet. Man kräver att hänsyn tas till dessa typbroar då väg- och järnvägsplan upprättas med de eventuella begränsningarna i korsningsvinkel detta kan innebära. Enligt en av intervjupersonerna innebär detta att vägprojekteringen i viss mån måste anpassas till bron och inte tvärtom.

På Banestyrelsens projekt Köpenhamn-Ringsted användes för broar över en spontad banskärning ett system med landfäste gjutna mot spontan, och en farbana med en underbyggnad av plattbärlag där yttrelementen inkluderade kantbalkar förberedda för räckan. Efter montage av elementen armerades överkanten och gjutning kunde ske (Jensen 2024). Detta innebär en högre grad av prefabricering och kortare byggtid med minskad störning och möjlighet till optimering.

Dessa exempel har en sak gemensamt. Det krävs att spår- och väganläggning projekteras och anpassas till de brotyper som man har valt. Detta måste vara förberett redan i tidiga skeden. Men i projekt Norrbotniabanan kunde man använda de utvecklade konstbyggnaderna i enbart 3 av över 30 broar, eftersom man vid framtagandet av järnvägsplanen ritat in korsningsvinklar med den framtida banan utan att anpassa den till de industriella broarna.

I sammanhanget bör nämnas att förprojekterade konstbyggnader givetvis inte kan användas överallt, men borde användas där det är möjligt. Trots svårigheter i tillämpning borde industriellt

byggande vara en möjlighet för framtiden. Förprojekterade broar borde kunna göras mer flexibla vad gäller t.ex. geometri, vilket dock kräver mindre stelbenta metoder i projekteringen. Försök har gjorts i Sverige med s.k. parameterstyrd projektering som automatiskt genererar handlingar, dock utan framgång hittills. Effektiv materialoptimering måste ha prioritet i en sådan utveckling.

5.3 Kortade byggtider leder till ökad materialförbrukning

Medan de inledande utrednings-, plan- och tillståndsprocesserna tar mer och mer tid i anspråk har genomförandetiden för själva byggentreprenaden kortats. Detta tenderar att medföra lösningar som ökar materialförbrukning och därmed klimatpåverkan. Några exempel på detta är

- I linjearbeten (väg, järnväg) ligger broar och andra konstbyggnader som regel på kritiska linjen för projektet. Vid byggandet prioriteras därför tidsvinster före möjligheten att spara material genom mer genomarbetade konstruktioner.
- Intervjuade experter vittnar om att man inte vill riskera att fastna i granskningsprocessen utan hellre konstruerar ”på säkra sidan”.
- I stället för att använda de jordmassor som finns i ”linjen” (massbalans) och som ofta kan kräva mer tid köper man in mer lättarbetade s.k. sidotagsmassor eller använder mer av tillverkade material för förstärkning mm.

6 Förslag till framtida åtgärder

6.1 Generella åtgärder

Inom projektet har vi regelbundet lyft frågan om vad som kan göras i framtiden för att minimera resursåtgång, miljöavtryck och kostnader i anläggningsbyggandet. Denna fråga har också varit central i intervjuer med experter och vid den industriworkshop som arrangerades sent i projektet. Givet att en mångfald av orsaker kan ligga bakom onödigt stor förbrukning av material och resurser finns det inga enkla lösningar på problemen. Men en rad förslag till åtgärder har identifierats och redovisas i detta kapitel.

En generell erfarenhet som många har framhållit från framgångsrika projekt är att de varit riggade så att samarbete mellan beställare och utförare har kunnat ske på ett tillitsfullt sätt av aktörer med god kompetens. Kända exempel på stora sådana projekt är Öresundsbron från 2000 och Citytunneln i Malmö från 2010. Flera vittnar också om mindre projekt där god samverkan lett till framgångsrikt resultat. En framtida åtgärd kan vara att organisera byggprojekt så att sådan samverkan blir möjlig. Förutsättningarna för detta redovisas närmare i avsnitt 5.2.2.3. Olika typer av hinder för att uppnå god samverkan bör identifieras och om möjligt avlägsnas. Kopplat med tillräckligt starka incitament att hushålla med resurser ger detta en möjlighet att reducera såväl kostnader som klimatavtryck.

Ett annat förslag som framkommit är att skapa en öppen databas med relevanta nyckeltal för mängder, baserad på byggnadsverk som tidigare byggts, med både goda och mindre goda exempel. Detta skulle kunna fungera som ett hjälpmedel för alla parter inblandade i liknande byggnadsverk att jämföra med och validera rimlighet mot. Utvecklingen av en sådan databas bör lämpligen ledas av Trafikverket som beställare men i nära samverkan med kvalificerade entreprenörer och konsulter.

Ytterligare ett allmänt förslag som bör övervägas är att utveckla och implementera ett meriteringssystem för konstruktörer med syftet att som beställare kunna värdera och ställa krav på erforderlig kompetens vid upphandling av konsulter. En första utredning om ett sådant system har redan gjorts med finansiering från Trafikverkets branschforskningsprogram BBT, se af Klintberg et al. (2018). Liknande system finns etablerade i andra länder som t.ex. Storbritannien och Tyskland.

För att åstadkomma byggnadsverk med hållbarhet och optimal resursförbrukning måste existerande regelverk utmanas och samtliga inblandade aktörer medverka inom sina områden. Nedan redovisas mer konkreta och detaljerade åtgärder kopplade till regelverk samt olika typer av aktörer.

6.2 Åtgärder kopplade till regelverk som styr projekteringen av byggnadsverk

Begreppet regelverk skall här ses som kombinationen av följande delar (se även avsnitt 3.1):

- Generella (konstruktions)regler i Eurokod
- Nationella tillämpningar av Eurokod numera hanterade av Transportstyrelsen
- Tillägsregler från beställaren (oftast Trafikverket)

Det har framgått i detta projekt att mängden regler som är aktuella har närmast exploderat och att det i praktiken görs skilda tolkningar, som i många fall leder till onödig materialförbrukning i byggandet. Vi föreslår följande åtgärder:

- Utvärdera och utmana ogynnsamma konsekvenser av regelsystemet och implementera förändringar via nationella tillämpningar och i samband med upphandling. För att få ett bra

underlag för detta bör man i relevanta verkliga byggprojekt använda kvalificerade granskare som utöver normal granskning också har uppdraget att utvärdera regelverkets lämplighet och effektivitet i relation till material- och resursåtgång.

- Trafikverket som stor beställare bör ta initiativ till att genomföra systematiska undersökningar av kvaliteten hos äldre konstruktioner för att få underlag att utvärdera och utveckla dagens regelverk t.ex. relaterat till beständighet och behov av minimiarmering. Sådana studier kan sammanfattas under det engelska begreppet reality checks. Man har ju stor potential att göra sådana genom att man har utmärkt dokumentation av utformning och tillstånd hos befintliga och gamla konstruktioner via broförvaltningssystemet BaTMan.
- Satsa resurser på att ta fram tydliga vägledningar och sprid dem till branschen för att få till stånd mer enhetlig och rimlig tolkning av det komplexa regelsystemet. Exempel på områden som berörts i denna rapport och där detta är relevant är trafikrelaterade laster, tvångslaster och hantering av dessa, beständighetskrav, minimiarmering, principer för utjämning och inläggning av armering vid FEM analys, etc.

Initiativ till dessa åtgärder bör tas av Trafikverket som dominerande beställare i nära samverkan med Transportstyrelsen. I genomförandet bör man engagera kompetenta och erfarna personer från konsult- och entreprenadföretag samt lämpliga forskare.

Ett exempel på lågt hängande frukt med stora möjligheter till materialbesparing i betongkonstruktioner är att utmana regelverket för minimiarmering, se vidare avsnitt 3.3.2 och 3.3.4 av denna rapport. Komplexa regler beskrivs i Eurokod med konstruerade matematiska formler utan solid vetenskaplig förankring, men uppfattas ändå av många konstruktörer som gedigna eftersom formlerna direkt leder till kvantitativa resultat. Syftet med reglerna är att begränsa sprickvidder i betongen på grund av tänkta odefinierade tvångsrörelser. Konstruktören kan oftast inte avgöra om detta är ett problem eller ej och väljer då att tillämpa regler som finns. Det enda rimliga skälet till att begränsa sprickvidder borde vara att minska risken för armeringskorrosion, men det kan starkt ifrågasättas om detta är relevant i situationer där man inte har någon exponering av klorider.

6.3 Åtgärder från beställare

Beställaren har en mycket viktig styrande funktion i ett byggprojekt genom att man skapar spelreglerna. Baserat på erfarenheterna som framkommit i detta projekt föreslår vi följande åtgärder:

- Uppmuntra och ge incitament till minimering av material- och resursförbrukning även i tidiga skeden av linjeprojekt.
- Rigga byggprojekt organisatoriskt så att inflytande ges åt aktörer med helhetsperspektiv och så att förutsättningar för tillitsfull samverkan mellan beställare och utförare finns.
- Se över granskningsprocessen så att den även sker på kvalificerad konceptuell nivå i stället för att enbart kontrollera uppfyllelse av detaljregler (som en del intervjupersoner flaggat för)
- Skapa möjligheter till erfarenhetsåterföring från byggskede till planskede för att förbättra processen efter hand
- Trafikverket som beställare bör möjliggöra enklare konstruktionsberäkningar för enklare byggnadsverk – allt måste inte dimensioneras i 3D.
- Utveckla metodik för att prissätta koldioxidavtryck för att skapa incitament till materialoptimering.

- Som beställare skulle man också i kontrakt kunna ta över ansvaret för eventuella dispenser från befintliga normer när det är motiverat.

En förutsättning för att genomföra dessa åtgärder är att beställaren har tillgång till egen kvalificerad teknisk kompetens. En frekvent synpunkt från intervjuade experter är att TRV länge har rustat ned sin tidigare tekniska kompetens för att i stället anlita konsulter och att detta ofta leder till problem. Flera menar att strategin *renodlad beställare*, som tillämpades under en period har varit förödande för effektiviteten i infrastruktursektorn.

6.4 Åtgärder från teknikkonsulter

En viktig orsak till överutnyttjande av material och resurser är bristande konceptuell förståelse och överdriven tro på avancerade analyser utan eftertanke. Det saknas ofta incitament till att motverka dessa tendenser både hos beställare och i det egna företaget. Vi föreslår följande:

- Prioritera att få bättre grepp om helheten för projektet så att arbetet hos medarbetarna genomsyras av detta.
- Utveckla affärsmodeller för att beskriva kvaliteten på det arbete man säljer och hur kunden kan tjäna på detta.
- Träna unga ingenjörer i konceptuellt tänkande
- Uppmuntra ingenjörer att tävla om effektiva nyckeltal avseende resursåtgång och miljöavtryck
- Ge medarbetare möjlighet till kvalificerad utbildning om bakgrunden till normer och regler, inklusive laster och säkerhetsfrågor
- Ifrågasätt regler och krav när det är motiverat
- Presentera lösningar på ett granskningsbart sätt där det finns stor variation i dagsläget

Det är uppenbart att de ekonomiska incitamenten i konsultbranschen är begränsade att erbjuda kvalitet till beställare som inte kan värdera *produkten* man köper. Ekonomiskt kan det vara mindre lönsamt att sälja färre timmar med högt mervärde för kunden men med högre timpris snarare än många fler timmar till lägre pris. Regelverk som t.ex. Lagen om offentlig upphandling (LOU) utgör också hinder för detta. Konsultbranschen borde ta initiativ till att i Sverige implementera meriteringssystem av den typ som i UK drivs av Institution of Structural Engineers (ISTRUCTE) och Institution of Civil Engineers (ICE) för att mer objektivt kunna beskriva kvaliteten på de tjänster man vill sälja (se även af Klinteberg et al. 2018).

6.5 Åtgärder från entreprenörer

Med entreprenör avses här ett företag som bedriver byggnation av anläggningar och konstbyggnader. Om man har en teknikavdelning inom företaget som också utför projektering är de åtgärder som föreslås för konsulter i avsnitt 6.4 relevanta.

Tillräckliga säkerhetsmarginaler är ju redan inbyggda i dagens regelverk. En uppenbar möjlighet att undvika överutnyttjande är att utnyttja konstruktörer (interna eller externa), som har den kompetens som krävs för att undvika alltför konservativa beslut. Ett bra system för meritering av konstruktörer skulle kunna bli ett hjälpmedel för upphandling av rätt kompetens och utveckling av ett sådant borde därför stödjas av entreprenörsföretagen.

Vi föreslår i övrigt följande:

- Sätt ökad fokus på att spara material även i byggskedet (även om detta kan innebära en viss ökning i form av tid)
- Ställ ökade krav på konstruktörer att produktionsanpassa sina handlingar
- Se till att ha god teknisk kompetens inom företaget bl.a. för att kunna upphandla underleverantörer
- I samverkansentreprenad bör entreprenören utnyttja samarbete med beställare och skapa de förutsättningar som krävs för att minska kostnader, tid och materialåtgång
- Se över produktionsmetoder med fokus på att möjliggöra materialsnåla lösningar med bättre ekonomi

Liksom alla andra industriaktörer bör entreprenörerna öka sitt fokus på att minimera materialmängder. I detta projekt har vi i mindre utsträckning studerat förhållanden kring själva byggproduktionen, men tidigare forskning har lyft fram att mer material används ofta vid bygget än de mängder som beräknas ur projekterade handlingar (Olanrewaju et al. 2022). Detta är ett område som entreprenörerna bör undersöka vidare.

6.6 Åtgärder från aktörer inom forskning och utbildning

Forsknings- och utbildningsaktörer har stort ansvar och har även drivit på den kraftiga utvecklingen av normregler och användningen av avancerade analysmetoder. Meritering som forskare sker ofta genom att visa att man behärskar ökad komplexitet, och för att få finansiering gäller det att övertyga omvärlden om den praktiska nyttan med mer avancerad metodik. Mindre utrymme ges till analys av de konsekvenser detta får i praktiken. Vi föreslår att man inom akademien initierar forskningsprojekt som kan besvara följande fråga:

- Är nuvarande regler och metoder som leder till ökade mängder och kostnader i byggandet motiverade genom att de leder till ökad livslängd och lägre underhållskostnader eller inte? Kan besvaras genom vetenskapliga undersökningar av äldre byggnadsverk vars utformning och status är dokumenterad.

Detta projekt har visat att denna typ av forskning är relevant för följande specifika delar i regelverket och nu använda metoder:

- Föreskrivna laster i regelverket (tvångslaster, vertikala trafiklaster, olyckslaster, bromslaster¹¹)
- Metodik för analys av konstruktioner (Vilken lägre grad av komplexitet krävs för en beslutsprocess som kan leda till materialbesparingar?)
- Regler för minimiarmering i betongkonstruktioner (Kan vi återinföra rimliga schablonregler för detta som vi hade förr?)
- Beständighetsrelaterade krav på täckskikt, sprickvidder och betongkvalitet. (t.ex. när är sprickor ett reellt problem? Kan besvaras genom utvärdering av status hos äldre byggnadsverk.)

¹¹ Vid skrivandet av denna rapport påbörjar ett doktorandprojekt på just detta område på LTH med handledningsstöd från KTH samt industristöd från Skanska och även Trafikverket

Vad gäller utbildningen av ingenjörer förmedlas ofta budskapet att ju mer avancerad metodik man kan använda ju bättre resultat erhålles i byggandet, vilket inte är korrekt. Något annat som även traditionellt funnits inom undervisningen är begreppet 'på säkra sidan' vilket kan leda till onödig materialåtgång. Utbildningen behöver i stället fokusera mer på följande punkter

- Ge träning i ingenjörstänkande och konceptuell förståelse redan i utbildningen
- Ge förståelse av bakgrund till normregler och de osäkerheter som ligger bakom, inklusive kunskap om laster och påverkningar.
- Motverka föreställningen att föreskrivna laster och påverkningar i normer är skrivna i sten och därmed hela sanningen. De utgör ju halva delen i varje konstruktionsproblem.
- Beskriv hantering av osäkerheter och risker i ingenjörsarbetet
- Motverka övertro på matematiska beräkningar som beslutsunderlag i konstruktionsarbetet.
- Lägg större fokus på hållbarhetsmål och behovet av materialbesparing

7 Sammanfattning och slutsatser

Anläggningssektorn står inför en stor utmaning den närmaste decennierna för att klara av de hållbarhetsmål som samhället ställer och mildra konsekvenserna av pågående klimatförändringar. I denna rapport lyfter vi fram en viktig del av detta arbete genom att fokusera på hur vi kan minska materialåtgång i byggnadsverk som broar och broliknande konstruktioner. En genomgång av hur materialåtgången ändrats de senaste 50 åren presenteras tillsammans med en analys över vilka faktorer som lett till den ökning som tydligt kan observeras. Fördjupade undersökningar på utvalda faktorer som ändringar i regelverk och projekteringsarbete görs och till sist presenteras förslag till framtida åtgärder för att undvika resursslöseri. Fokus är på betongkonstruktioner som är dominerande för byggnadsverk i Sverige.

I rapporten har vi visat att en systematisk ökning har skett över tid av den mängd byggmaterial som används. En djupare analys visar att orsakerna bakom ökningen är komplexa men att förändringar i regelverk och projekteringsarbete har haft en signifikant påverkan. När det gäller frågan om den observerade ökningen är motiverad, finns det varken tydliga bevis för eller emot, men man kan inte dra slutsatsen att äldre byggnadsverk är generellt sämre än det som byggs idag.

Våra analyser belyser att normerna blivit succesivt mer konservativa. Trafiklaster för såväl väg- såsom järnvägsbroar har ökat över tid samtidigt som t.ex. beständighetskrav på betongkonstruktioner skärpts. När det gäller trafiklaster i dagens regelverk finns en inbyggd reservkapacitet för nybyggda broar jämfört med de som redan existerar. Detta kan anses delvis motiverat med tanke på hur mycket väg- och järnvägstrafiken ändrats det senaste halvsekle. Det finns i nuläget inget bra svar på frågorna om exakt hur stor reservkapacitet man behöver, samt om alla broar behöver förses med lika stora reserver. Samtidigt kan vi se att ökning av nyttiga trafiklaster (t.ex. ökade fordonsvikter) ger måttligt ökade materialmängder. Fokus bör i stället läggas på att utreda andra laster (t.ex. bromskrafter och temperaturlaster) som kan ge betydligt större mängdökningar.

Krav kopplade till beständighet rörande sprickvidder, minimiarmering, täcksikt och betongkvalitet har förändrats över tid liksom metoderna för att beräkna sprickvidder med empiriska formler. Det är dock svårt att bedöma de praktiska konsekvenserna av dessa förändringar eftersom de interagerar på ett komplext sätt. Det som har en potentiell stor påverkan på materialåtgången är krav kopplat till minimiarmering där existerande empiriska formler kan ge orimliga resultat för dimensioner som är vanliga för bro- och tunnelkonstruktioner. Generellt behövs det en grundlig analys av funktionen hos dagens krav på beständighet, vilka generellt medför ökad materialförbrukning och ökat klimatavtryck för armerade betongkonstruktioner. Analysen bör baseras på undersökningar av äldre konstruktioner för att se vilka krav som fungerar som tänkt.

Utöver regelverk har även projekteringsarbetet förändrats signifikant de senaste 50 åren. Två viktiga förändringar är: (1) ökad omfattning av detaljregler med ökad komplexitet och (2) ökad användning av avancerade datorbaserade konstruktionsberäkningar. När regelverken blir mer detaljerade och komplexa kan detta leda till ett ändrat beteendemönster för ingenjören. Fokus dras ifrån verifiering av grundläggande samhällskrav om säkra och funktionella konstruktioner till att istället uppfylla alla specifika krav från en checklista utan vidare reflektion om kraven är relevanta (se avsnitt 4.2).

En övergång till alltmer avancerade konstruktionsberäkningar kan vidare innebära väsentliga risker för onödig materialförbrukning samtidigt som det kräver mycket mer tid av ingenjören jämfört med om enklare beräkningsmodeller används. I rapporten visar vi, med exempel, hur vissa

modelleringsbeslut kan leda till ökade mängder. Möjligheter till materialoptimering finns men kräver mer tid samt specialkunskap om hur t.ex. tvångseffekter hanteras i en 3D beräkningsmodell. Dessutom är det troligt att kravet på produktionsanpassning kommer att minimera den möjligheten i praktiken. Knäckfrågan i detta sammanhang är om och när det extra arbetet är motiverat och kostnadseffektivt i fall där en enklare och mindre tidskrävande modelleringsstrategi leder till jämförbara resultat med mindre risk för fel.

En annan viktig aspekt som bör beaktas för att möjliggöra materialbesparing och undvika resursslöseri är plan- och byggprocessen. Beslut tagna i tidiga skeden kan både ge förutsättningar för men även förhindra den möjligheten. Inlåsnings tidigt i ett projekt kan göra det väldigt svårt för konstruktörer att materialoptimera konstruktionen. Det är därför viktigt att tillräcklig tid och resurser tillhandahålls i tidiga skeden för att stödja ett proaktivt arbete mot mer materialsnåla, hållbara och därmed billigare konstruktioner.

Beslut under projekterings- och byggnationsskeden är även viktiga och kan utgöra möjligheter eller hinder för minskad materialförbrukning. En viktig aspekt som lyfts fram är behovet av ett bra samarbete mellan beställare, konstruktör och entreprenör. Tidiga kontakter och öppenhet mellan parter samt en bra dialog i projekten är viktiga, särskilt med hänsyn till klimatfrågor. Det behövs dessutom en vilja att identifiera alternativa utföranden som kan vara dyrare men är mer effektiva.

För att ta itu med problemet om en ökad materialåtgång krävs det en samlad approach där beställare, konstruktörer, entreprenörer och även akademi medverkar. Viktiga åtgärder för att minska resursåtgång och kostnader i byggprojekt som lyfts fram är att:

- främja samverkan mellan beställare och utförare med fokus på helhetsperspektiv och tillitsfull samverkan,
- skapa en öppen databas med nyckeltal för mängder från tidigare byggprojekt,
- utveckla ett meriteringssystem för konstruktörer för att säkerställa nödvändig kompetens,
- utmana och förtydliga existerande regelverk för att undvika onödig materialförbrukning, och
- uppmuntra konceptuellt tänkande hos ingenjörer och ifrågasätta regler när det är motiverat.

Vi lever i stor utsträckning i en kultur som kännetecknas av rädsla att göra fel och bryta mot diverse regler. En faktor som tydligt framkommit i intervjustudien är bristen på kompetenta aktörer med helikopterperspektiv i byggprocessen. Man vittnar om att ingenjörsarbetet nu mer handlar om att följa regler än om kreativt arbete. Denna kultur måste brytas om vi skall kunna utveckla och bygga anläggningar på ett samhällsekonomiskt och hållbart sätt.

Kanske bör vi reflektera över Sveriges Ingenjörers hederskodex som ursprungligen togs fram av Svenska Teknologföreningen år 1929. Hederskodexen visas i sin ursprungliga form i Figur 7.1 och dagens version från Sveriges Ingenjörer återges nedan. Särskilt de tre första punkterna är relevanta för de problem som behandlas i denna rapport.

Sveriges Ingenjörer hederskodex¹²:

1. Ingenjören bör i sin yrkesutövning känna ett personligt ansvar för att tekniken används på ett sätt som gagnar människa, miljö och samhälle.
2. Ingenjören bör sträva efter att förbättra tekniken och det tekniska kunnandet i riktning mot ett effektivare resursutnyttjande utan skadeverkningar.
3. Ingenjören bör ställa sitt kunnande till förfogande i offentliga och enskilda sammanhang för att uppnå bästa beslutsunderlag och belysa teknikens möjligheter och risker.
4. Ingenjören bör inte arbeta inom eller samverka med företag och organisationer av tvivelaktig karaktär eller med mål som strider mot personlig övertygelse.
5. Ingenjören bör visa full lojalitet mot arbetsgivare och arbetskamrater. Svårigheter härvidlag bör tas upp till öppen diskussion, i första hand på arbetsplatsen.
6. Ingenjören får inte använda otillbörliga metoder i tävlan om anställning, uppdrag eller beställning, ej heller försöka skada kollegors anseende genom obefogade beskyllningar.
7. Ingenjören bör respektera anförtrodda upplysningars konfidentiella natur samt andras rätt till uppslag, uppfinningar, utredningar, planer och ritningar.
8. Ingenjören får inte gynna obehöriga intressen och bör öppet redovisa ekonomiska och andra intressen som kan påverka tilltron till hans eller hennes opartiskhet och omdöme.
9. Ingenjören bör enskilt och offentligt, i tal och skrift, sträva efter ett sakligt framställningssätt och undvika felaktiga, missvisande eller överdrivna påståenden.
10. Ingenjören bör aktivt stödja kollegor, som råkar i svårigheter på grund av ett handlande i enlighet med dessa regler, samt enligt bästa övertygelse avstyra brott mot dem.

¹² Hämtad 2025-02-13 från <https://www.sverigesingenjorer.se/om-forbundet/organisation/hederskodex/>



SVENSKA TEKNOLOGFÖRENINGENS HEDERSKODEX

Inom olika yrkesgrupper har vid sidan av mer generella, ur det allmänna rättsmedvetandet framprungna grundsatser även utbildats av resp. yrkens art och ansvar betingade rättsregler. Ehuru dylika regler givetvis varken kunna eller böra göras så detaljerade, att de täcka alla i det praktiska livet förekommande fall, torde de kunna tillmätas betydelse så till vida, som de klargöra, i vilken anda en del hithörande spörsmål böra bedömas. De erhålla därigenom närmast karaktär av *riktlinje* för yrkets korrekta bedrivande.

Svenska Teknologföreningen har, härvid följande exempel av ett flertal utländska ledande tekniska sammanslutningar, ansett lämpligt att till sina medlemmar anbefalla följande vid allmänt sammanträde den 20 februari 1929 antagna.

Riktlinjer för ingenjörens och arkitektens lojala uppträdande under sin yrkesutövning gentemot allmänhet och kolleger.

1. Ingenjören resp. arkitekten bör bedriva sin verksamhet under full lojalitet mot kolleger i olika ställningar, över- och underordnade, arbetsgivare och arbetstagare.

2. Han bör undvika att taga någon som helst befattning med företag av tvivelaktig karaktär.

3. Han får icke använda illojala metoder i tävlan om anställning, uppdrag eller beställningar, ej heller under någon förevändning söka skada kollegers anseende genom oberättigad kritik, obefogade beskyllningar eller anspelningar. Där sådant förekommer, är det hans plikt att efter bästa övertygelse uppträda häremot.

4. Han bör noga beakta, huruvida kommersiella och tekniska upplysningar, som han erhållit som förtroendeman, tjänsteman eller uppdragstagare, äro av konfidentiell natur, och han bör respektera andras rätt till uppslag, uppfinningar, utredningar, planer och ritningar.

5. Han bör öppet tillkännagiva för uppdragsgivare, chefer och andra vederbörande, om ekonomiska och andra intressen, som möjligen kunna påverka hans omdömes opartiskhet.

6. Han får icke mottaga ersättning, ekonomiskt eller annorledes, från mer än ett håll, utan samtliga parter medgivande. Provisioner, som icke äro av alla parter kända och medgivna, få icke förekomma.

7. Han får icke vid utövandet av sin befattning i allmän eller enskild tjänst eller vid fullgörande av mottaget förtroendeuppdrag gynna obehöriga intressen, egna eller andras.

8. Han bör såväl enskilt som vid offentligt uppträdande, i litterära publikationer samt vid annonsering bemöda sig om ett sakligt och värdigt framställningssätt och undvika felaktiga, missvisande eller överdrivna påståenden.

9. Han skall söka bidra till teknikens utveckling, och, därest ej bärande skäl föreligger för ett motsatt förfarande, ställa sina erfarenheter och rön till kollegers förfogande. Han skall hava intresse av att bibringa allmänheten en korrekt, av biavsikter oberörd uppfattning i tekniska spörsmål.

10. Han skall ständigt minnas, att hans yrkesutövning såväl som de tekniska vetenskaperna böra stå i samhällets, fosterlandets och mänsklighetens tjänst.

Figur 7.1. Svenska Teknologföreningens Hederskodex från 1929 (hämtad från https://www.sverigesingenjorer.se/globalassets/ingenjorshistoria/dokument/pdf_stf_b1b_hederskodex.pdf)

8 Referenser

- Addis, W. (1990). *Structural engineering: the nature of theory and design*. New York: Ellis Horwood.
- Andersson P, Blomdahl J, Bond H, Ekström T et al. (2016). *Eurokoder för dimensionering av betongdammar – förslag på tillämpning i Sverige*. Rapport 2016:309, Energiforsk.
- Angelino M, Agarwal J, Shave J & Denton S (2014). Development of successful design standards: Understanding the challenge. In *37th IABSE Symposium on Engineering for Progress, Nature and People (pp. 527-534)*. International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE).
- Barlow L & Metaxas S (2020). Urban Insight – Carbon cost in infrastructure: the key to the climate crisis? Sweco.
- Betongföreningen (2010). Svenska Betongföreningens Handbok till Eurokod 2. Betongrapport nr 15, Vol. 1, Stockholm.
- Betongföreningen (2024). *Guide för reduktion av betongkonstruktioner*.
<https://klimatguiden.betongforeningen.se/> (hämtad 2025-02-12).
- Björnsson I (2015). *Holistic approach in engineering design - controlling risks from accidental hazards in bridge design*. PhD Thesis TVBK 1048, Lund University.
- Björnsson I (2016). From code compliance to holistic approaches in structural design of bridges. *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, 142(1): 02515003.
- Björnsson I, Crocetti R, Fröderberg M, & Klasson A (2016). Is advanced modelling always synonymous with increased accuracy? *Structural*, 208 (nov/dec), 1-18.
- Björnsson, I (2022) *Opportunities and challenges of digitalization and automation in bridge design: A pre-study*. TVBK-3078, Division of Structural Engineering, Faculty of Engineering, Lund University, Lund.
- Björnsson, I, Ivanov, OL, Honfi, D, & Leander J (2019). Decision support framework for bridge condition assessments. *Structural Safety*, **81**, 101874.
- Borthwick A, Carpenter J, Clarke B, Falconer R & Wicks J (2012). The importance of understanding computer analyses in civil engineering. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 166(CE3): 137-143.
- Bulleit WM (2012). Structural building codes and communications systems. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 17, 147-151.
- Bygginnovationen (2010). *Slutrapport Bygginnovationen, Bilaga C-Bro*. SBUF Projekt 12180.
- Calgaro J-A (1998). Loads on bridges. *Progress in Structural Engineering and Materials*, **1**(4):452-461.
- Carlsson F (2006). *Modelling of traffic loads on bridges based on measurements of real traffic loads in Sweden*. PhD Thesis TVBK 1032, Lund University.
- Coeckelbergh M (2006). Regulation or responsibility? Autonomy, moral imagination, and engineering. *Science, Technology, & Human Values*; **31**(3): p. 237-260.

- Davis M (2012). A plea for judgment. *Science & Engineering Ethics*, 18, 789-808.
- Dawes P (2003). *Research Perspectives: Traffic Loading on Highway Bridges*. Thomas Telford Publishing, London.
- Ferguson ES (1992). *Engineering and the Mind's Eye*. MIT Press.
- Gottsäter E (2019). *Restraint Effects in Concrete Bridges: A Study of Cracking due to Thermal Actions and Shrinkage in Portal Frame Bridges*. PhD Thesis – TVBK 1054, Lund University.
- Jensen (2024). Sonny Jensen, Banestyrelsen. Personlig kommunikation.
- Joelsson A-E (2021). *Kostnadsökningar i bygg- och anläggningsbranschen*. Sweco 2021-03-16. (<https://www.sweco.se/blogg/kostnadsokningar-i-bygg-och-anlaggningsbranschen/>)
- af Klintberg T, Björk F, Molnár M, Nilsson M, Plos M, Silberbrand J, Thelandersson S. (2018) *System för personlig meritering och certifiering för ingenjörer inom den svenska byggsektorn*. TRITA-ABE-RPT, 1833, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm.
- Koen BV (2003). *Discussion of the method: conducting the engineer's approach to problem solving*. Oxford: Oxford University Press.
- Kurrer KE (2008). The history of the theory of structures - from arch analysis to computational mechanics. Berlin: Ernst & Sohn.
- Litborn J, Dackerud A, Norin J, Eurenium M et al. (2024). Trafikverkets Miljörapport 2023. TRV 2024/10875. Borlänge.
- MacLeod IA (2016). Time to reflect: a strategy for reducing risk in structural design. *The Structural Engineer*, 94(3): 14-18.
- Maiers C (2018). Reading the Tea Leaves: Ethnographic Prediction as Evidence. *Ethnographic Praxis in Industry Conference Proceedings*. **2018** (1): 351–363.
- Muttoni A & Ruiz MF (2012). Levels-of-approximation approach in codes of practice. *Structural Engineering International*, **2/2012**, 190-194.
- Nethercot DA (2012). Modern codes of practice: what is their effect, their value and their cost? *Structural Engineering International*, **2/2012**, 176-181.
- Nolinder M (2023). *Analysis of combined response of railway bridge and track – a parametric finite element model of the bridge across Bryngeån*. Examensarbete TRITA-ABE-MBT-23477, Kungliga Tekniska Högskolan.
- Olanrewaju BA, Panesar DK & Saxe S (2022). A comparison of concrete quantities for highway bridge projects: preconstruction estimates vs onsite records. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 7(5), 589-605.
- Petroski H (1985). *To engineer is human: the role of failure in successful design*. New York: St. Martin's Press.
- Petroski H (1994). *Design paradigms - case historie of error and judgment in engineering*. Cambridge: Cambridge University Press.
- SBUF (2015). *Slutrapport – Eurokoder och EKS effekter på byggkostnader*. SBUF Projekt 12928.

- Shapiro S (1997). Degrees of freedom: the interaction of standards of practice and engineering judgment. *Science, Technology, & Human Values*; 22(3): p. 286-316
- Skanska (2018). *Nya sjukhusområdet Malmö – Bärighetsutredning befintlig kulvert*. Daterad 2018-11-20. Malmö
- Sundquist H (2005). *Infrastrukturkonstruktioner*. Byggkonstruktion, Kungliga Tekniska högskolan.
- Trafikverket (2019). *BaTMan – Handbok*. Hämtad 2019-09-18.
- Trafikverket (2021). Samrådsredogörelse: Göteborg-Borås, en del av nya stambanor. TRV 2019/1823
- Trafikverket (2022). Samhällsekonomisk analys - Ej beräknade effekter. Version 1.3
- Turell C & Tengvall J (2024). *Utformning och dimensionering av plattrambroar – en analys av byggnormers inverkan på materialanvändning*. Examensarbete TVBK 5304, Lund University.
- Vick SG (2002). Degrees of belief: subjective probability and engineering judgment. ASCE Press, Virginia.
- Vincenti WG (1990). *What engineers know and how they know it: analytical studies from aeronautical history*. Baltimore: John Hopkins University Press.

Bilaga A Fallstudier

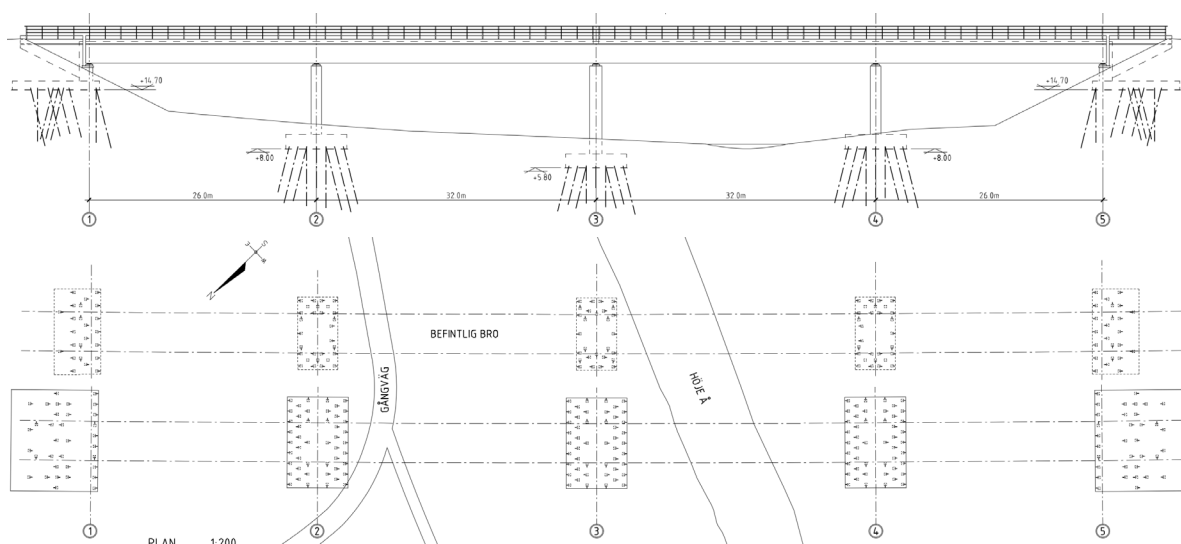
A.1 Broar 3500-1293-1, 3500-1293-2 över Höje å

A.1.1 Bakgrund, materialåtgång och tillståndsbedömning

Två broar som konstruerades 1975 respektive 2021 över Höje å är spännarmerade lådbalksbroar i fyra spann för järnvägstrafik (dubbelspår på vardera bron). Båda broarna har samma spännvidd (26m för ytterspann, 32m för innerspann). Figur A.1 visar plan- och elevationsritningar av bron och Figur A.2 visar foto.

Båda broarna har konstruerats av samma företag. Den nya bron har i anbudsskedet även dimensionerats av samma konstruktör som har varit ansvarig för den befintliga bron. Man har även använt samma programvara i anbudsskedet för den nya bron. Anbudsmängder och slutliga mängder visar en relativ bra överensstämmelse.

Den befintliga bron har även bärrighetsklassats för linjekategori E5 i 120 km/h och en dynamisk analys med dimensionerande hastighet 250 km/h har visat att bron får trafikeras av samtliga HSLM tåg.



Figur A.1. Plan- och elevationsritningar av Höjeåbroarna

Tabell A.1 visar regelverk som användes vid dimensionering av befintlig och ny bro över Höje å.

Tabell A.1. Regelverk som använts vid konstruktion av befintlig respektive ny bro över Höje å

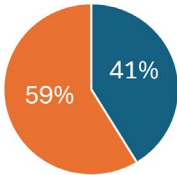
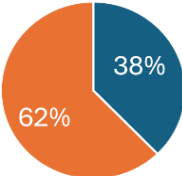
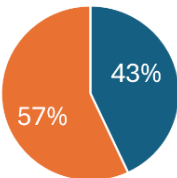
	Befintlig bro	Ny bro
Betong	B1-1960, B5-1973, B6, B7-1968, B9-1970, B10-1972	Eurokod 2
Trafikverket	Lastbestämmelser SOU 1961:12 VV bronorm 1969	TRVK Bro 11 (2011) TRVK Geo 13 (2013)



Figur A.2. Foto av ny bro över Höje å

En detaljerad jämförelse av mängd material i befintlig och ny bro över Höje å visas Tabell A.2. Visar på en kraftig ökning både för betong och armering.

Tabell A.2. Jämförelser av mängder i befintlig och ny bro över Höje å

	Befintlig bro	Ny bro	Δ	Ny / Befintlig andel av total
Betong [m³]				
Överbyggnad	838	941	12%	
Underbyggnad	459	904	97%	
Pålar	153	275	80%	
Armering [t]				
Överbyggnad	66	109	65%	
Underbyggnad*	24	133	454%	
Spännarmering [t]				
Överbyggnad	25,1	33,2	32%	
CO2 emission [t]				
Betong	500	730	46%	
Armering	66	176	166%	

* Den befintliga bron är inte armerade i alla ytor (ingen minimiarmering). Detta ger en stor påverkan.

Enligt data från BaTMan-systemet har den äldre bron få skador som är kopplade till lastpåverkningar. Det fanns enstaka sprickor med vidder 0,1-0,3 mm i underbyggnaden. I överbyggnaden fanns sprickbildning kring räckesståndarna (vanligt förekommande problem) och även 0,3 mm sprickor i två invändiga tvärbalkar. Själva lådbalken hade ett område med 0,1mm sprickor på utsidan vid ett stöd.

Bortsett från detta fanns har ett flertal byggfel åtgärdats, t.ex. synliga järn vid droppnäsor och avsaknad av formstagslagning på ett antal ställen.

Dessutom fanns även andra vanliga återkommande underhållsproblem kopplade till brodetaljer: bättringsmålning av lager, läckage i övergångskonstruktionen, utbyte av grundavlopp och förlängning av ytavlopp (pga. läckage).

A.1.2 Väsentliga orsaker till resursökning

Två huvudorsaker har identifierats som drivande för ökad materialförbrukning, se Tabell A.3.

Tabell A.3. Huvudorsaker till ökade mängder i den nya bron över Höje å

	Befintlig bro	Ny bro	Förklaring
Ballast (Överbyggnad)	18 kN/m ³ x 0,5m = 9,0 kN/m ²	20 kN/m ³ x 0,6m x 1,3 = 15,6 kN/m ²	Vikten för ballast har ökat från 18 till 20 kN/m ³ . Ballasthöjden har ökat från 0,5m till 0,6m. I Eurokod infördes en faktor för osäkerhet i ballasthöjden (t.ex. framtida höjning av spår). Det nationella valet är 30% ökning.
Bromslast (Underbyggnad)	1340 kN	4640 kN 3320 kN	Bromslasten har ökat kraftigt pga projektbeslut (full bromslast på 2 spår) och regelverket. <i>Bromslast enligt regelverk (full bromslast på 1 spår + 1000 kN på andra spåret)</i>

A.1.3 Möjligheter till materialbesparingar

Ballast:

- Ballast hade kunnat ersättas t.ex. med slabtrack för att minska vikten. Detta medför en högre investeringskostnad, men lägre underhållskostnad. Å andra sidan försämrar brons dynamiska egenskaper och det kan i praktiken vara en olämplig lösning eftersom det finns ballast i området utanför bron.
- Variationsfaktorn som numera är 1,3 kan ändras genom att ange den som nationellt val. Man bör utreda om faktorn är rimlig.

Bromslast:

- Bromslasten tas upp i mittstöden. Man hade kunnat montera dämpare i landfästen som överför endast dynamiska laster (den lösningen används ibland i Finland). På det sättet hade man kunnat överföra bromslasten direkt till motfyllnaden.

- Mittstöden är utformade med fasta lager. En inspänning av mittstöden i överbyggnaden hade kunnat reducera moment på grund av bromskraft i bottenplattan med ungefär 50%. (Horisontallasten blir dock oförändrad). Denna utformning medför dock samtidigt högre laster i överbyggnaden från broms- och tvångseffekter. Påkänningar i rälerna påverkas endast marginellt av förändrat utförande (eftersom pelarna är så pass veka att inspänning inte gör någon större nytta i just detta fall).
- I projektet beslutades det att bron skulle dimensioneras för full bromslast på båda spåren. Det nationella regelverket medger dock en reduktion på andra spåret som borde ha utnyttjats.
- På grund av oklara regler har bron försetts med dilatationsanordning i spår (vid båda landfästena). Detta medför att ingen interaktion är möjlig med angränsande bank och all bromslast måste omhändertas av bron. En TBI (Track-Bridge-Interaction) analys som utfördes i efterhand bekräftade behovet av dilatationsfogar för att uppfylla då gällande Eurokod (notera att analysen gjorde för båda statiska systemen). Remissutgåvan för de nya Eurokoderna medger dock högre påkänningar i räler. Baserad på dessa kommande regler hade bron troligen kunnat utformas utan dilatationsfogar.

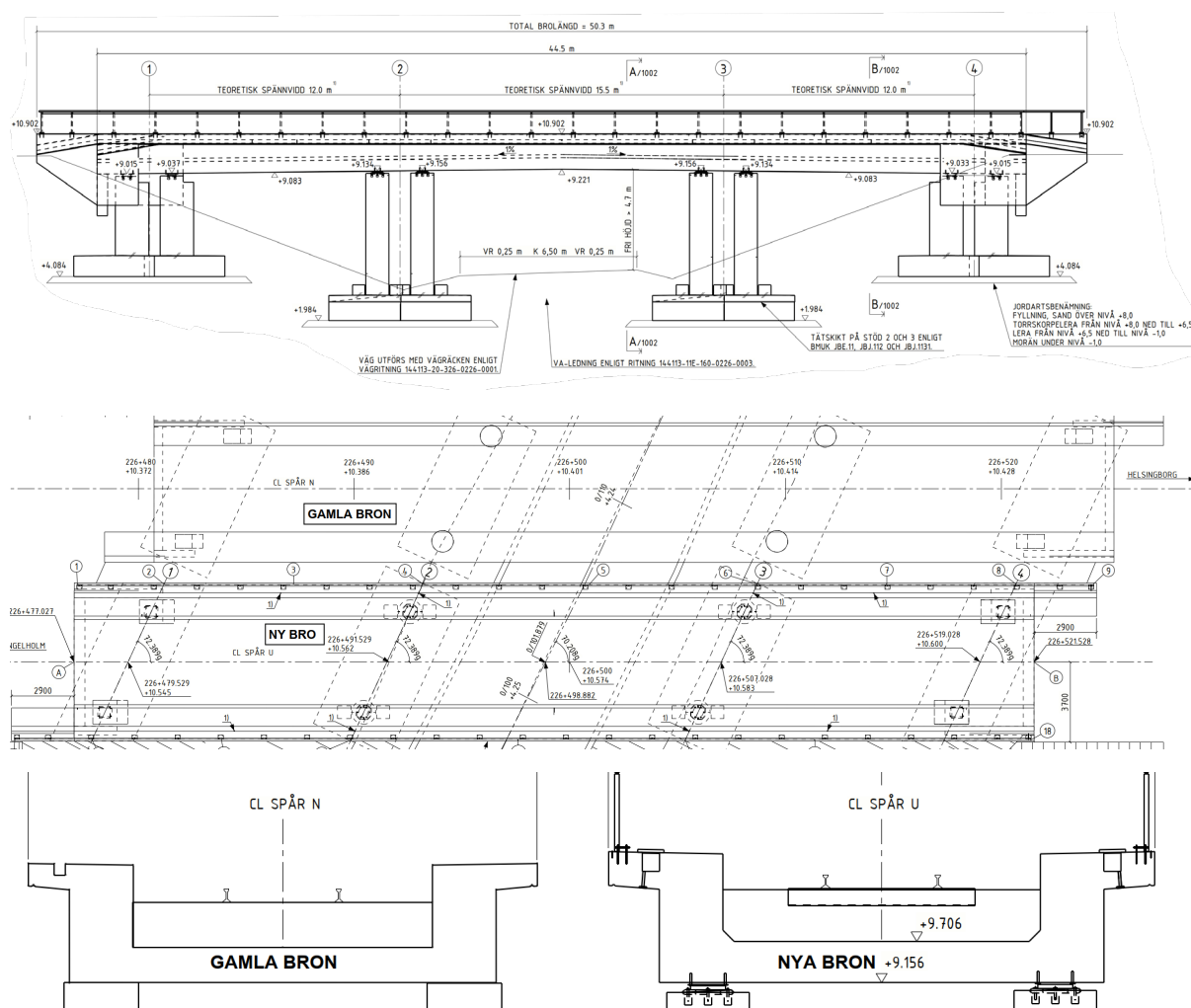
A.2 Bro 3500-3609-1 och -2 i Ängelholm

A.2.1 Bakgrund, materialåtgång och tillståndsbedömning

Järnvägen mellan Ängelholm och Helsingborg (Maria) byggdes 2020 ut till dubbelspår varvid det byggdes en ny bro precis bredvid en gammal med väldigt lik utformning.

Järnvägsbroarna går över väg 1438 i Helsingborg på järnvägssträckan mellan Ängelholm och Helsingborg. Broarna är i tre fack med spännvidderna 12,0, 15,5 och 12,0 meter, och tvärsnittet är av typen trågbalkbro som är slakarmerat. Den äldre bron är byggd 1990 och nya bron 2022.

Figur A.3 visar elevations-, plan- och sektionsritningar och i Tabell A.4 redovisas regelverk som användes vid dimensionering av broarna.



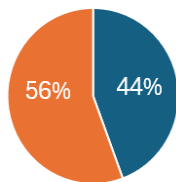
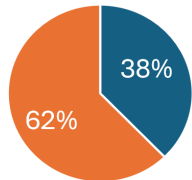
Figur A.3. Ritningar för järnvägsbroarna i Ängelholm

Tabell A.4. Regelverk som använts vid konstruktion av befintlig respektive ny bro i Ängelholm

	Befintlig bro	Ny bro
Betong	B1-1960 utg. 2 1982, B5-1973 utg. 2 1978, B6-1968 utg. 2 1978, B7-1968	Eurokod 2
Trafikverket	Lastbestämmelser SOU 1961:12 VV bronorm 1976 med tillägg publikation 1978:84	Krav Brobyggande V2 (2016) TRVK Geo 13 (2013)

En detaljerad jämförelse av mängd material i befintlig och ny bro redovisas i Tabell A.5. Visar på signifikanta ökningar både för betong och armering.

Tabell A.5. Jämförelser av mängder i befintlig och ny bro i Ängelholm

	Befintlig bro	Ny bro	Δ	Ny / Befintlig andel av total
Betong [m³]				
Överbyggnad	229	277,3	21%	
Underbyggnad	95	129	36%	
Armering [t]				
Överbyggnad	35	56,8	62%	
Underbyggnad	-	-	-	
CO2e emission [t]				
Betong	112	140	25%	
Armering	26	41	62%	

Enligt aktuella data från BaTMan-systemet har arbete på äldre bron utförts 2019 där räckesinfästning kompletterades. Aktuella skador som fanns registrerade:

- Spricka i kantbalk 0,3 mm (byggfel)
- Krackelering på betongbalk (byggfel), åtgärd impregnering
- Spricka i balk 0,5 mm, åtgärd injektering

A.2.2 Väsentliga orsaker till resursökning

Fyra huvudorsaker har identifierats som drivande för ökad materialförbrukning, se Tabell A.6.

Tabell A.6. Huvudorsaker till ökade mängder i den nya bron.

Rubrik	Befintlig bro	Ny bro	Förklaring
Brukstadiet (Överbyggnad UK)	Förenklade sprickviddskrav med T-formeln	Sprickviddskrav 0,15mm för UK brobana, Exponeringsklass XD3 Livslängd L100	Nya krav i Eurokod 2 på kontroll av sprickbredder i kvasipermanent lastkombination, vilket ökar armeringsmängden i UK fält.
Utmattning (Skjuvbyglar)	Förenklad kontroll av utmattning	Utmattningskontroll I med teknisk livslängd 120år och trafikvolym $25 \cdot 10^6$ ton/år/spår	Nya krav i Eurokod 2 på kontroll av utmattning. Ökar armeringsmängden i några snitt, särskilt bockade byglar.
3D-effekter (Vridarmering, upphängningsarmering, tvärgående skjuvbyglar och tvärgående böjarmering)	2D-beräkning med Strip Step 2	3D FEM-modell med Brigade/PLUS	3D modell ger upphov till större vridmoment än beräkningsmodeller i samband med 2D-beräkningar. Snedvinkliga stöd ger toppvärden i FEM-modeller som inte tas hänsyn till i 2D-modeller.
Minimiarmering (+Sekundärarmering i skarvområde)	Mindre krav i äldre standarder	Eurokod 1992-1-1	Minimiarmeringskrav i 1992-1-1 i sekundär riktning ger mycket extra armering. Med ökande betongtjocklekar för att hantera högre laster m.m. ökar även minimiarmeringen eftersom tjockleken är en faktor i kraven. Krav på tvärgående armering i skarvområde 92-1-1 kap. 8.7.4 ger extra armering vid skarvning av byglar som inte finns i befintlig bro.

Notera att skillnader i de vertikala tåglasterna för de olika normerna (tåglast LM71 i Eurokod och 1960 års belastningsbestämmelser) inte har ökat armeringsmängderna.

A.2.3 Möjligheter till materialbesparingar

Minimiarmering:

- I järnvägsbroar användes förr normalt en minimiarmering av $\phi 12$ s200 vilket begränsar konstruktörens val av olika armeringsdimensioner, centrumavstånd och system för armeringen. Detta begränsar konstruktörens möjlighet att optimera armeringen.
- Eurokod 1992-1-1:2005 kapitel 9.2.1.1 ger ofta upphov till stora minimiarmeringskrav. Konstruktören bör överväga om dessa krav är relevanta för konstruktionen.

Ballast:

- Ballast hade kunnat ersättas t.ex. med slabtrack för att minska vikten. Detta medför en högre investeringskostnad, men lägre underhållskostnad. Åtgärden ger upphov till mindre egentynad och mindre armering för sprickviddsbegränsning. Slabtrack kan också vara gynnsamt vid dynamisk kontroll av bron eftersom man tillåter högre accelerationer.

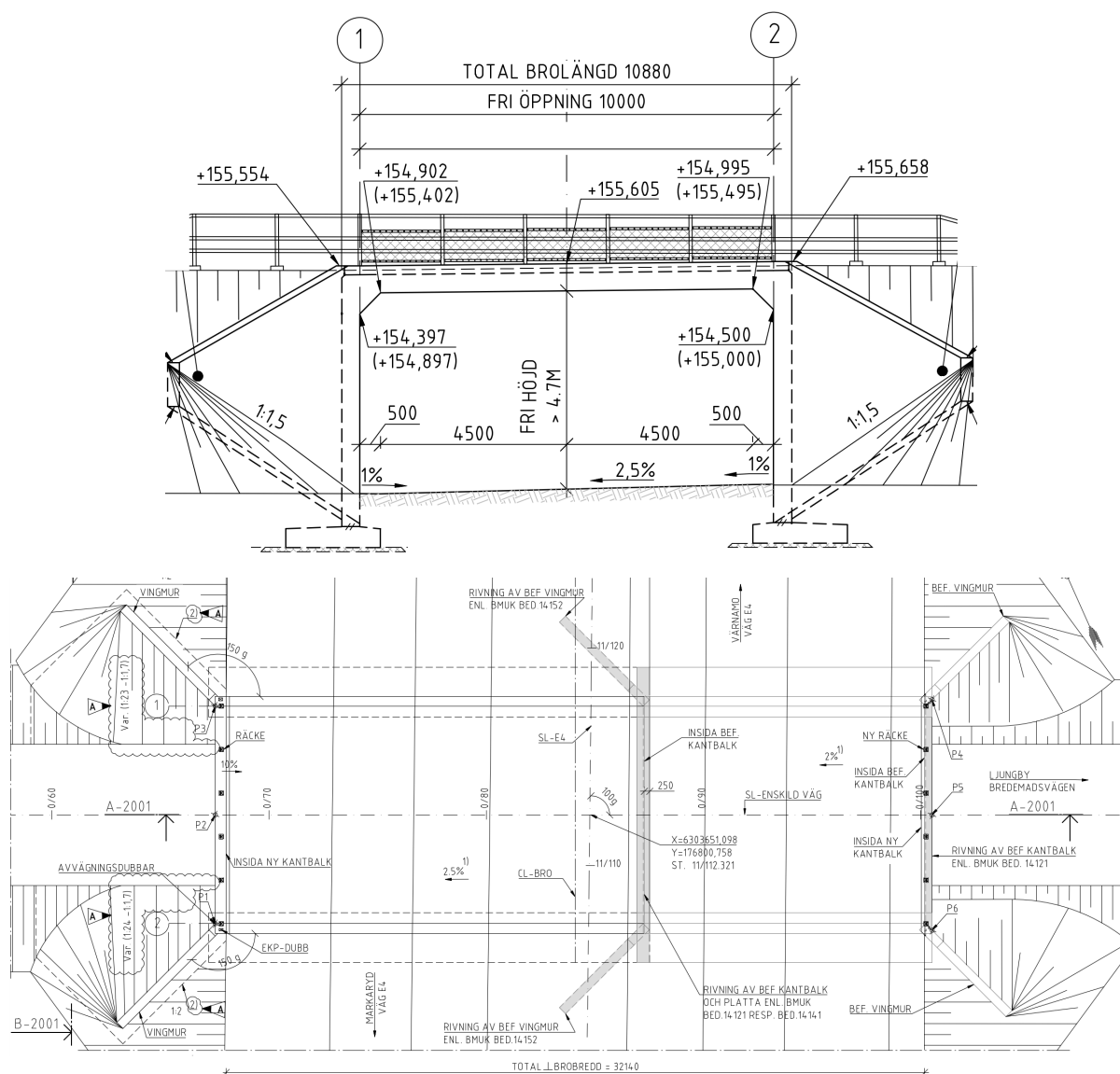
Förprojektering med RKFM (Redogörelse för Konstruktionsarbetets Förutsättningar och Metoder) och konstruktionsstartmöte:

- Konstruktören bör utnyttja konstruktionsstartmötet för att diskutera tolkningen och användningen av normer och standarder för att kunna optimera konstruktionen.

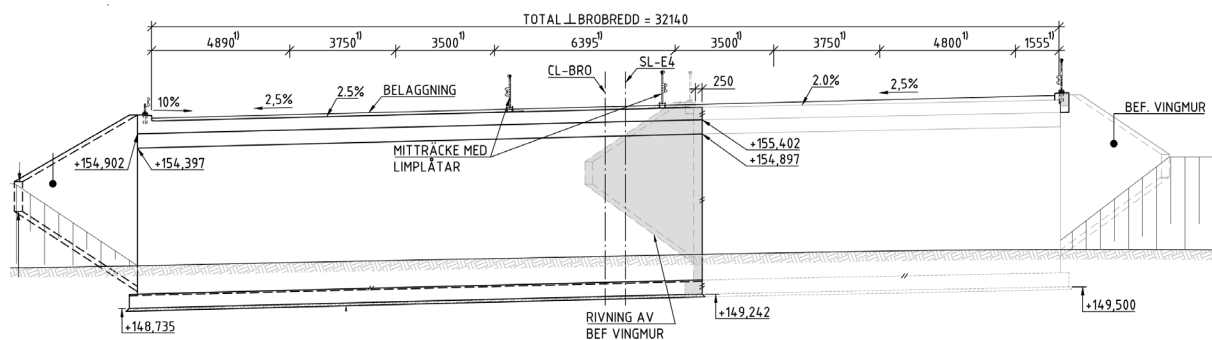
A.3 Vägbro i Ljungby, väg E4 och Bro 7-431-1

A.3.1 Bakgrund, materiallåtgång och tillståndsbedömning

Bron är en breddning utförd 2020 av en befintlig platttribro för vägtrafik som konstruerades 1978. Broarna har samma spännvidd (10,44m) och tvärsnittsmått (ramben 440mm och farbana 440mm). Sektions- och planritningar redovisas i Figur A.4. Elevationsritningar visas i Figur A.5. I Tabell A.7 redovisas regelverk som användes vid dimensionering av respektive bro.



Figur A.4. Breddning av E4 vid Ljungby. Sektion visas överst och plan nederst. Ny bro till vänster och befintlig till höger.



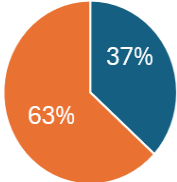
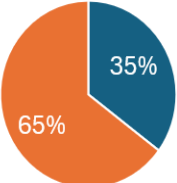
Figur A.5. Elevation som visar befintlig del och ny del efter breddning av vägbron i Ljungby

Tabell A.7. Regelverk som använts vid konstruktion av befintlig respektive ny bro i Ljungby

	Befintlig bro	Ny bro
Betong	1968, 1972 och 1973 års Betongbestämmelser. 1968 B6-1968 & B7-1968, 1972 B10-1972, 1973 B5-1973. 1960 års Cementbestämmelser, 1960 B1-1960	Eurokod 2
Trafikverket	1975 års provisoriska trafiklastbestämmelser för vägbroar samt i övrigt SOU 1961:12, VV bronorm 1976	Krav Brobyggande V1 (2016) TRVK Geo 13 (2013)

Jämförelse av mängd armering per ytenhet i överbyggnaden för befintlig och ny bro redovisas i Tabell A.8. Visar på en ökning av armeringsmängd och CO2-emission med 70-85 % i den nya bron.

Tabell A.8. Jämförelser av armeringsmängder i befintlig och ny bro.

	Befintlig bro	Ny bro	Δ	Ny / Befintlig andel av total
Armering [kg/m²]				
Överbyggnad fält	37,2	64,0	72%	Armering fält 
Överbyggnad stöd	26,8	49,3	84%	
CO2e emission [kg/m²]				
Armering fält	27	47	72%	Armering stöd 
Armering stöd	20	36	84%	

På den gamla bron utfördes olika åtgärder mellan 1996 och 2023, inklusive impregnering av kantbalk, komplettering av räcke, samt breddning och utbyte av kantbalk. Aktuella skador registrerade i BaTMan-systemet: 106 observerade skador på formstagslagningar, 2 sprickor med vidd 0,2 mm i frontmur.

A.3.2 Väsentliga orsaker till resursökning

Fyra huvudorsaker har identifierats som drivande för ökad mängd armering i den nya bron, se Tabell A.9.

Tabell A.9. Huvudorsaker till ökade armeringsmängder i den nya bron i Ljungby

Rubrik	Befintlig bro	Ny bro	Förklaring	Andel
Brukstadiet (Överbyggnad tvärled)	Förenklade sprickviddskrav med T-formeln	Sprickviddskrav brobana 0,20mm för UK och 0,30 för ÖK, Exponeringsklass XD1 resp. XD3 Livslängd L50	Nya krav i Eurokod 2 på kontroll av sprickbredder i kvasipermanent lastkombination.	5 %
Utmattning (Stöd längdled ÖK och fält längdled UK kantstrimla)	Förenklad kontroll av utmattning	Utmattningskontroll med teknisk livslängd 80år och trafikvolym $0,5 \cdot 10^6$ tunga fordon/år/körfält	Nya krav i Eurokod 2 på kontroll av utmattning.	7 %
3D-effekter (Böjarmering tvärled, kantstrimla UK och skjuv-armering)	2D-beräkning med Ramanalys i VV-540	3D-beräkning med LUSAS v. 17.0	3D modell ger upphov till krafter i tvärled som är flera gånger större än krafterna i gamla handberäkningen enligt B7. 3D-modell ger större krafter i kantstrimla när spridning endast kan ske i en riktning.	66 %
Avkortning (Längsgående armering i UK stöd och ÖK fält)	Endast en strimla kontrollerad i längsgående riktning.	Kontroll i flera längsgående strimlor för många olika lastkombinationer.	Befintlig bro är kontrollerad i endast en strimla men i flera snitt. Ny bro är kontrollerad i flera olika strimlor men färre snitt. Avkortningen är bättre optimerad i befintlig bro.	22 %
				100 %

Notera att armeringen i brons bärriktning inte har ökat trots ökade trafiklaster utan slutsatsen är att den stora ökningen av armeringen ligger i brons tvärriktning.

A.3.3 Möjligheter till materialbesparingar

Avkortning och minimering av armeringsmängder:

- Konstruktören bör arbeta mer effektivt med fokusering mot att avkorta och minimera armeringskurvorna.
- Konstruktören bör arbeta mer ingenjörsmässigt genom att dela in bron i olika områden för att minimera armeringsmängderna.

Inverkan av tvångseffekter

- Konstruktören bör bevaka inverkan av tvångseffekter såsom temperatur, krympning och stödsättningar för att erhålla en realistisk modell.

Förprojektering med RKFM och konstruktionsstartmöte:

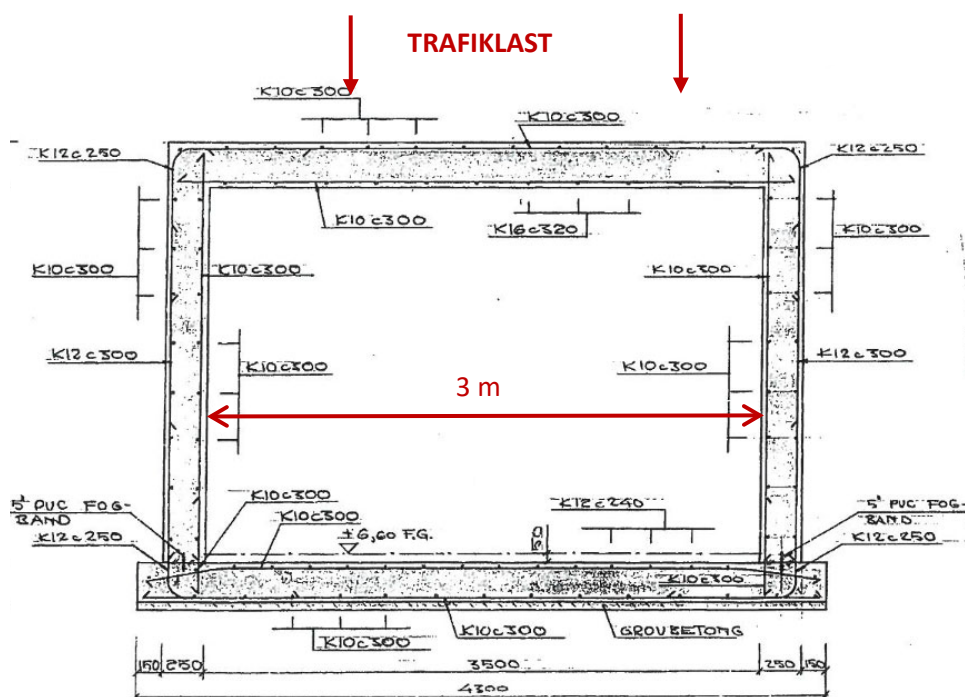
- Konstruktören bör utnyttja konstruktionsstartmötet för att diskutera tolkningen och användningen av normer och standarder för att kunna optimera konstruktionen.

A.4 Kulvertar Malmö allmänna sjukhus

A.4.1 Bakgrund, materialåtgång och tillståndsbedömning

I samband med omfattande nybyggnad och ombyggnad på sjukhusområdet byggdes nya transportkulvertar under jord kring 2020. Ett kulvertsystem från 60-talet fanns redan på området och kommer delvis att användas även i fortsättningen. Här finns möjlighet att jämföra utformningen av kulvertar med samma funktion byggda nyligen samt 60 år tidigare. Samtliga konstruktioner belastas vertikalt med samma typ av trafiklast. Figur A.6 visar tvärsnitt av en kulvert byggd 1960 med inre bredd 3 m. Tjockleken på valv, väggar och bottenplatta varierade mellan 250 och 300 mm. Armeringen är dimensionerad i huvudsak för att ta upp verkande laster. Armering runt hörn har också avkortats på basis av beräknade lasteffekter. Utöver detta har man schablonarmering $\varnothing 12 \times 300$ på ut- och insida i såväl tunnelns längd- som tvärriktning utom för ytor där lastupptagande armering redan finns.

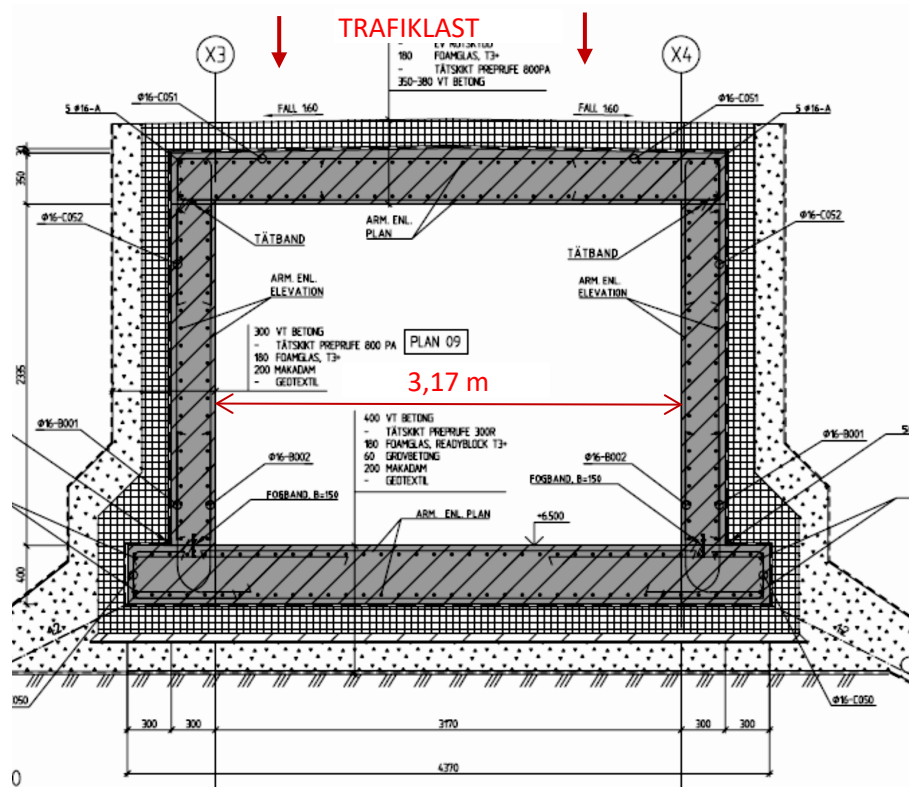
Bärigheten hos den gamla kulverten verifierades i en gedigen rapport från 2018, se Skanska (2018).



Figur A.6. Tvärsnitt av kulvert A byggd 1960.

Figur A.7 visar tvärsnitt av en kulvert B byggd 2020 med inre bredd 3,17 m. Tjockleken för valvet är 350 mm, för väggar 300 mm och för bottenplatta 400 mm. Här har man valt att lägga in schablonarmering 16 s 120 på både ut- och insida i tunnelns längd- och tvärriktning. Detta innebär en mycket stor mängd armering som inte motiveras av laster utan handlar troligen om tolkning av normregler kopplade till krav på minimiarmering, se avsnitt 3.3.2 och 3.3.4.

Materialåtgången jämförs mellan den gamla och nya kulverten i Tabell A.10. Det framgår att trots samma funktion, nästan samma spännvidd och lika utformning har materialförbrukningen och därmed klimatavtrycket ökat drastiskt från 1960 till idag. Såväl byggkostnad som koldioxidavtryck i tabellen har uppskattats med schablonvärden direkt kopplade till materialmängderna. Man bör då notera att cementmängden per volymenhet i den nya kulverten är signifikant högre än i den gamla. Detta innebär att ökningen av CO₂e egentligen är större än vad tabellen visar.



Figur A.7. Tvärsnitt av kulvert B byggd 2020

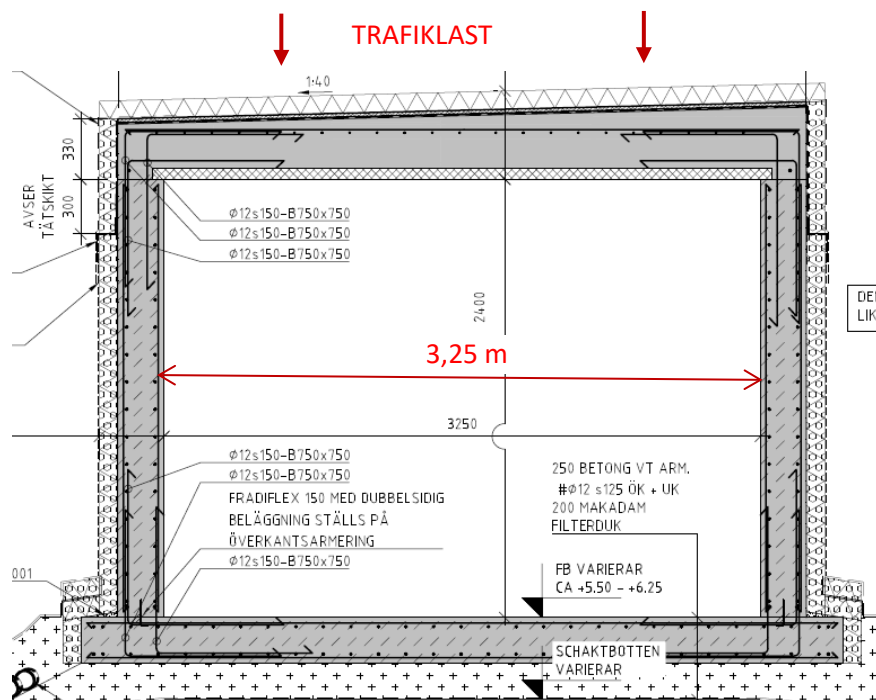
Tabell A.10. Jämförelse mellan kulvertar byggda 1960 och 2020.

Data	Kulvert A 1960	Kulvert B 2020	Differens	Differens %
Betong (m ³ /m kulvert)	3,22	4,90	1,58	+ 52
Armering (ton/m kulvert)	0,156	0,76	0,6	+354
Byggekostnad (kSEK 2020/m kulvert)	14	33,4	19,4	+139
Ton CO ₂ E/m kulvert	1,02	1,75	0,73	+72

A.4.2 Väsentliga orsaker till resursökning

Orsakerna till den ökade mängden armering är tydlig. Av någon anledning har man i den nyare kulverten lagt in en stor mängd schablonarmering, som är svår att motivera. Man har troligen gjort en mycket konservativ tolkning av reglerna för minimiarmering i Eurokod. I den äldre kulverten är armeringen som behövs för att ta upp lasteffekter korrekt beräknad och enbart kompletterad med en mindre mängd schablonarmering.

Skillnaden beror alltså i huvudsak på beslut som rör val av minimiarmering eller schablonarmering. I projektet 2020 anlätade man också ett andra företag för dimensionering av en annan kulvert C med liknande spännvidd, se Figur A.8. Det är intressant att jämföra mängden schablonarmering i de olika varianterna. Jämförelsen i Tabell A.11 visar att olika tolkningar av regelverket görs av olika aktörer och att mängden minimiarmering i dagens regler har ökat signifikant. Mängden schablonarmering är 6-7 gånger högre i kulvert B och 3-4 gånger högre i kulvert C jämfört med den gamla kulverten.



Figur A.8. Tvärsnitt av jämförbar kulvert C från 2020.

Tabell A.11. Jämförelse av schablonarmering och betongmängd mellan olika kulvertvarianter

Kulvert	Schablonarmering Ut- och insida längs- och tvärriktning	Armerings- area/lager mm ² /m	Jämförelse- tal	Mängd betong m ³ /m kulvert	Jämförelse- tal
A 1960	Ø 10 s 300	262	1,0	3,2	1,0
B 2020	Ø 16 s 120	1675	6,4	4,9	1,52
C 2020	Ø 12 s 125	904	3,5	3,4	1,06

Ökningen av mängden betong med ca 50 % i kulvert B är svårare att förklara, se Tabell A.10 och A.11. Ökning av tjocklekar för väggar, valv och bottenplatta kan inte förklaras med behov att ta upp laster. Orsaken är sannolikt konservativa beslut och brist på incitament att spara mängder. Ökningen för kulvert C är enbart marginell och beror huvudsakligen på något ökade dimensioner för denna jämfört med kulvert A.

A.4.3 Möjligheter till materialbesparingar

En uppenbar möjlighet att undvika överdimensionering av betongtjocklekar är att skapa incitament till materialbesparing och anlita konstruktörer som har kompetens nog att undvika alltför konservativa beslut bara för att vara på säkra sidan. Säkerhetsmarginaler är ju redan inbyggda i dagens regelverk.

Men den stora boven i dramat i detta fall är de komplexa regler för minimiarmering som finns i dagens normer, särskilt Eurokod 2, se också avsnitt 3.3.4. Reglerna beskrivs med konstruerade matematiska formler utan solid vetenskaplig förankring, men uppfattas ändå av många konstruktörer som gedigna eftersom formlerna direkt leder till kvantitativa resultat. Syftet med reglerna är att begränsa sprickvidder i betongen på grund av tänkta odefinierade tvångsrörelser. Det enda rimliga skälet till att begränsa sprickvidder i kulvertarna skulle vara att minska risken för

armeringskorrosion, men det kan starkt ifrågasättas om detta är relevant här där man inte har någon exponering av klorider.

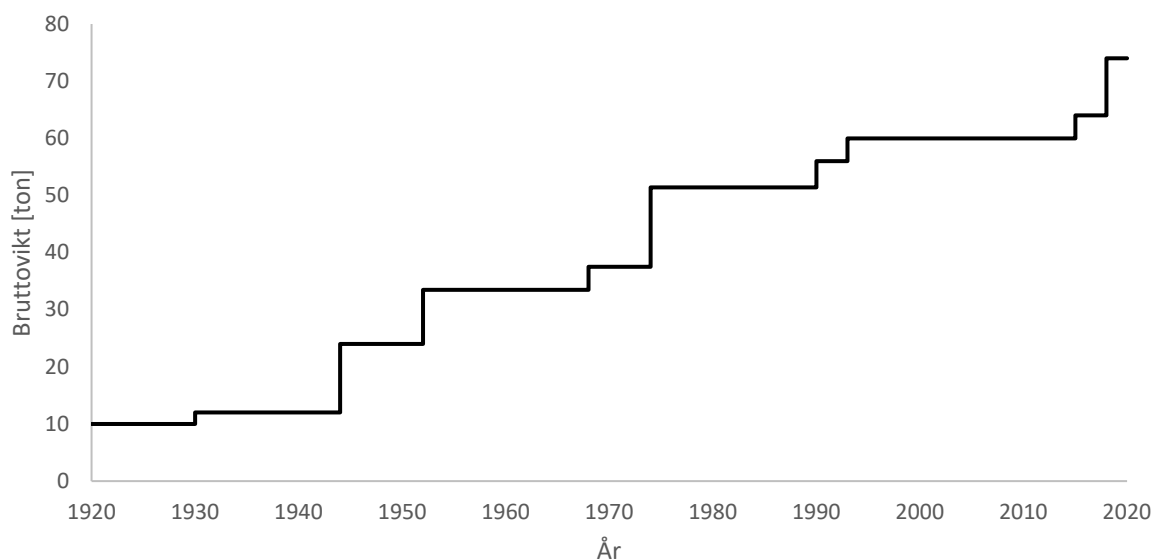
Mot denna bakgrund är en möjlighet till materialbesparing i detta fall att utmana regelverket för minimiarmering, vilket närmare beskrivs i avsnitt 3.2 av denna rapport. Konstruktörer bör tillämpa sådana regler med stor försiktighet och eftertanke och inte slentrianmässigt leta efter mest konservativa alternativ för att ha ryggen fri. Beställare bör se till att regelverket verkligen är motiverat och avstå från granskare som bara kontrollerar om alla detaljregler är uppfyllda. Som beställare skulle man också kunna ta över ansvaret för eventuella avsteg från befintliga normer när det är motiverat.

Nyckelfrågan här är om den kraftigt ökade armeringen i de nya kulvertarna faktiskt ger bättre prestanda eller bara kan ses som slöseri med resurser och material. Det finns inget som tyder på att den begränsade schablonarmeringen i den 65 år gamla kulverten från 1960 har lett till kortare livslängd. Kulverten har undersökts och verifierats att ha tillräcklig bärförmåga, se Skanska (2018). Men den uppvisar vissa skador hos den gamla betongen, vilket kan bero på karbonatisering efter lång tid. Men detta hade inte kunnat förhindras genom att öka mängden sprickarmering utan beror enbart av täcksiktstjocklek och miljö.

Bilaga B Historik, normer och lastökningar

B.1 Historik för bruttovikt av vägfordon

Fordonens tillåtna bruttovikt har ökat mycket kraftigt under de senaste hundra åren, se Figur B.1. Diagrammet visar att bruttovikten på fordon har fördubblats från år 1968 till år 2020.



Figur B.1. Utveckling av tillåten bruttovikt för fordon i Sverige.

Nuvarande regler för bruttovikt kopplade till bärighetsklasser med tillåtna axeltryck redovisas i Tabell B.1.

Tabell B.1. Nu gällande viktbestämmelser uppdelad på olika bärighetsklasser enligt Transportstyrelsen¹³ med angivna tillåtna bruttovikter samt axel-, boggie- och trippelaxeltryck för vägfordon

	Bärighetsklass			
	BK1	BK2	BK3	BK4
Bruttovikt [ton]	64	51,4	37	74
Max axeltryck ¹ [ton]	11,5	10	8	11,5
Max boggitryck ² [ton]	20	16	12	20
Trippelaxeltryck ³ [ton]	25	22	13	25

1 – drivande axel; 2 – avstånd mellan axlar 1,8- 2,0m; 3 – avstånd mellan första och tredje axel 4,4-4,7m

¹³ Hämtad från <https://www.transportstyrelsen.se/sv/vagtrafik/yrkestrafik/gods-och-buss/matt-och-vikt/viktbestammelser/tillatet-axel-boggi-och-trippelaxeltryck/> (2025-02-13)

B.2 Historik av normer för brobyggande

B.2.1 Bronormer det senaste 50 åren

Följande är en lista över *väg- och järnvägsbronormer* det senaste 50 åren:

Vägbroormer

- 1969, VV Bronormer 1969
- 1976, VV Bronormer 1976
- 1988, Bronorm 88
- 1994, Bro 94
- 2002, Bro 2002
- 2004, Bro 2004

Järnvägsbronormer

- 1992, Järnvägsbronorm
- 1995, BV Bro

Väg- och järnvägsbronormer

- 2009, TK Bro
- 2011, TRVK Bro 11
- 2016, Krav Brobyggande (fortfarande gällande)
- 2020, Krav TRVINFRA-00227

När det gäller lastförutsättningar fanns det även följande dokument:

- 1960 års belastningsbestämmelser (SOU 1961:12)
- Provisoriska trafiklastbestämmelser vägbroar TB 124 1975
- Tåglast 89: Lastförutsättningar för järnvägsbroar

Under de senaste 50 åren är två viktiga händelser av intresse: (1) införande av partialkoefficienter år 1988 i Bronorm 1988 och (2) införande av Eurokod samt TK Bro år 2009.

B.2.2 Trafiklast på vägbroar

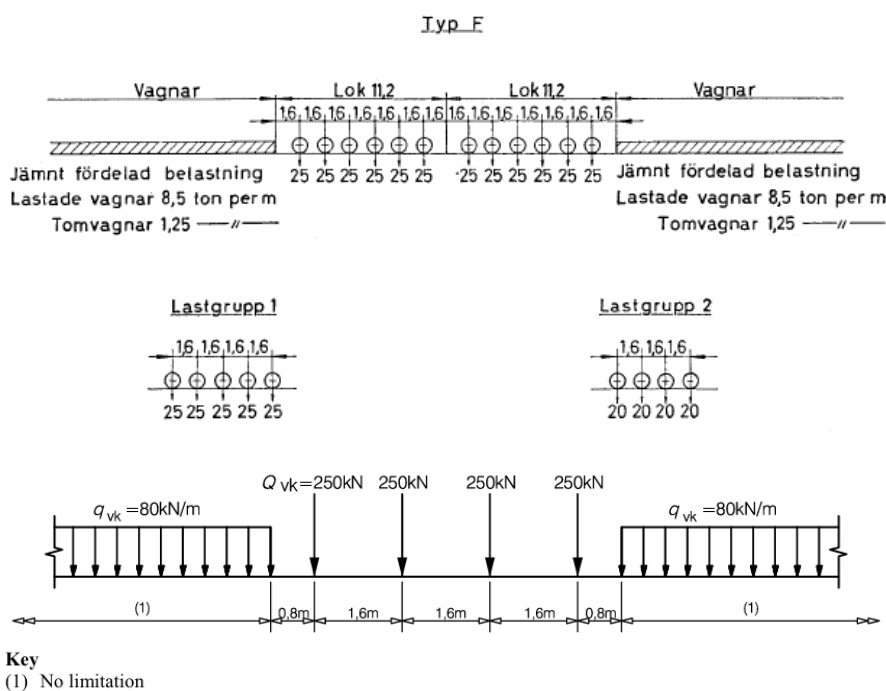
Trafiklaster i konstruktionsregler för vägbroar har förändrats de senaste 50 åren enligt Figur B.2. Två exempel, från 1960 års lastbestämmelser (SOU 1961:12) och Eurokod (SS-EN1991-2:2003) visas även i Figur B.2.

En jämförelse mellan trafiklasternas grundvärden visar att trafiklasten på vägbroar har ökat kraftigt från 1960 till 2009 vilket främst motiveras av ökningen av fordonens tillåtna bruttovikt som redovisas i avsnitt B.1. Observera dock att lastvärdena är kopplade till lastkonfigurationer som varierar mellan olika normer, vilket inte gör dem direkt jämförbara, se Fifur B.3. Från och med Bronorm 1988 definieras lasterna också som karakteristiska, vilket innebär att de formellt definieras i statistiska termer. I tidigare normsystem användes i stället nominella laster, och säkerheten hanterades i sin helhet genom reduktion av bärförmåga med en enskild säkerhetsfaktor. Detta innebär att lasterna före ca 1985 inte är direkt jämförbara med laster i nuvarande normformat.

att värdena i Figur B.4 ska ökas ytterligare med en faktor α . När det gäller jämförelser över tid gäller samma reservationer som för vägbroar, se avsnitt B.2.2.

1960	1970	1980	1990	2000	2010	2020
Gällande bronorm / belastningsbestämmelse						
1960års belastnings-bestämmelser SOU 1961:12			Tåglast 89	BV Bro	TK Bro	TRVK Bro 11
Partialkoefficientmetoden införes			Eurokod införs för broar			
Krav Brobyggande						
TRVINFRA						
Vertikala trafiklaster på järnvägsbroar angivna i bronormer						
Typ F 2 st lok: 6 axlar c/c 1,6 m L = 11,2 m per lok P = 250 kN (per axel) q = 85 kN/m (vagnar)			<u>Tåglast 89 & BV Bro (1-4)</u> UIC 71 & Tans (SW/2) P = 4x250 kN q = 80 kN/m Malm & Trans (SW/2) P = 4x300 kN q = 120 kN/m		<u>BV Bro (5-9)</u> BV 2000 P = 4x250 kN q = 80 kN/m Malm 2000 P = 4x350 kN q = 120 kN/m	
LM7 P = 4x250 kN q = 80 kN/m SW/0 2 st linjelaster: q = 133 kN/m (L = 15 m) fritt mått 5,3 m SW/2 2 st linjelaster: q = 150 kN/m (L = 25 m) fritt mått 7 m						
Bromslaster på järnvägsbroar angivna i bronormer						
Spår 1: 1/7 av tåglasten Spår 2: 1/7 av loklasten			UIC 71 20 kN/m ≤ 4000 kN Malm & Trans 30 kN/m ≤ 6000 kN		BV 2000 27 kN/m ≤ 5400 kN Malm 2000 30 kN/m ≤ 6000 kN	
LM7, SW/0 20 kN/m ≤ 6000 kN SW/2 35 kN/m						

Figur B.4. Vertikala trafiklaster på järnvägsbroar angivna i bronormer från 1960 och framåt (notera att 1998 års provisoriska belastningsbestämmelser inte finns med i bilden). OBS att endast lastvärdena mellan 1988 och 1998 är direkt jämförbara pga skillnader i säkerhetsformat i bronormerna före och efter den tidsperioden.



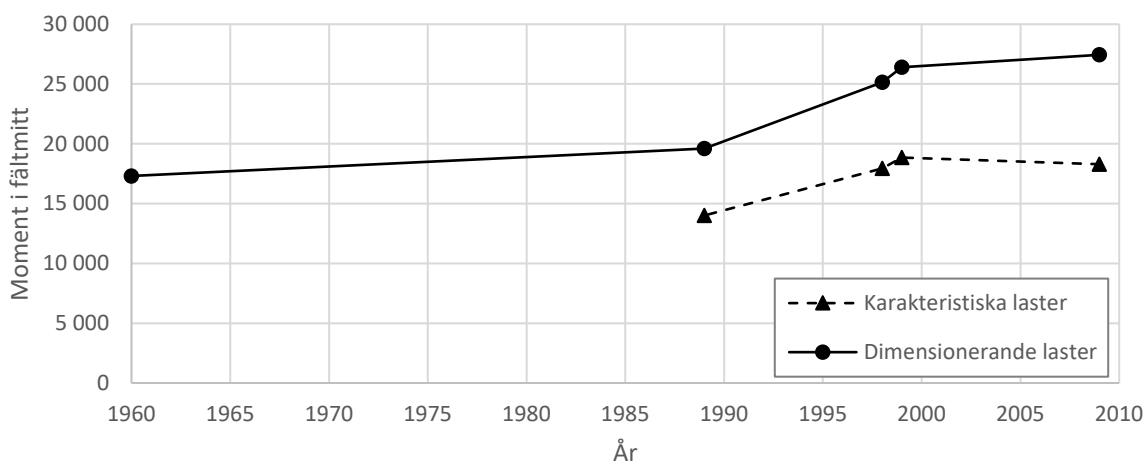
Figur B.5. Trafiklaster på järnvägsbroar enligt 1960 års belastningsbestämmelser SOU 1961:12 (överst) och Eurokod SS-EN1991-2:2003 (Lastmodell LM7 nederst). OBS att lastvärdena är inte direkt jämförbara pga ändringar säkerhetsformat i bronormerna.

För att få en tydligare jämförelse av lasteffekter från vertikala tåglaster har momentet för en fritt upplagd järnvägsbro med spännvidden 30 meter beräknats med olika normvarianter som funnits över tid. Resultatet visas i Figur B.6. Notera att den *karakteristiska lasten* från 1989 och framåt är direkt jämförbar framåt i tiden trots ändring i normsystem, medan värdet från 1960 inte är direkt jämförbart. Man ser att det karakteristiska momentet ökar med ca 35 % från 1989 till 1999.

Ökningen beror i huvudsak på införandet av den tidigare nämnde α -faktorn. Denna faktor beskriver en ökning av tåglasten vilken införts i Eurokod som en nationellt vald parameter. Notera att lasterna som redovisas i Figur B.6 avser i Sverige *normal* järnväg med $\alpha = 1,33$ och inkluderar dynamiskt tillskott. För Malmbanan och sträckor med tung massgodstrafik skall man använda ännu högre värden på α -faktorn.

Lastvärden från 1960 är inte jämförbara med senare värden eftersom man har ändrat säkerhetsformat. Värdena från denna äldre tid borde varit lägre för att ge samma dimensioner.

Vad gäller kurvan för *dimensionerande laster* i Figur B.6 är ändringarna från 1960 till 1989 samt från 1999 till 2009 inte jämförbara på grund av ändringar i säkerhetsformat.



Figur B.6. Beräknade moment i fält-mitt på en 30 m lång järnvägsbro med laster från olika bronormer. OBS! att endast lastvärdena mellan 1988 och 1998 är direkt jämförbara pga skillnader i säkerhetsformat i bronormerna före och efter den tidsperioden.

Utvecklingen av bromslast från tåg har även jämförts för en fritt upplagd bro med spännvidden 45 meter. Resultaten redovisas i Tabell B.2 och Figur B.7. Bromslasterna anges som dimensionerande värden och har reducerats enligt aktuella normer för åren 1988 till 2005.

Figur B.7 visar att bromslasten *före* reduktion har ökat signifikant jämfört med tidigare genom införandet av Eurokod. Bromslasten har traditionellt reducerats med ett schablonvärde eftersom en del av bromskraften överförs till spåren utanför bron. I Eurokod används inte schablonvärden för denna reduktion för broar under 40m, utan man förutsätter att man utför en mer komplex s.k. TBI-analys, där TBI står för *Track Bridge Interaction*. Vid en TBI analys kan man påvisa att bromslasten reduceras genom att last överförs via rälen till angränsande järnvägsbank. TBI analysen inkluderar dock lasterna temperatur och vertikal tåglast vilka ökar den horisontella lasten i brobanan.

En TBI-analys har ej utförts för år 2009 men det bedöms att detta inte leder till någon reduktion av bromslasten på bron. Denna slutsats baseras på resultat som presenteras i Nolinder (2023). Med

detta i beaktan har *dimensionerade* bromslaster *efter* reduktion ungefär dubblerats från 1988 och framåt. Lasterna är direkt jämförbara under denna period med ett undantag. På grund av nytt säkerhetsformat i Eurokod blir *dimensionerande* lasten 20 % högre jämförbart med tidigare normversioner. Men trots detta kan man konstatera att bromslasterna ökat signifikant i senare års regelverk.

När en TBI-analys utförs kombineras bromslast, temperaturlast och vertikala tåglaster i en olinjär beräkning. Man erhåller en reduktion av själva bromslasten samtidigt som övriga laster ökar den totala horisontella påkänningen. Den ökningen är beroende på temperaturvariationer mellan räler och bro samt att den vertikala tåglasten ger upphov till olika deformationer mellan räler och bro.

Eurokod (SS-EN 1991-2:2004 kapitel 6.5.4.6.1) beskriver en förenklad metod som innebär att:

- Bromslasten kan reduceras (upp till 60%) för broar kortare än 40 meter beroende på om det finns dilatationsfog i rälen vid en eller båda landfästen
- Extra last från temperaturvariationer, F_{Tk} , tillkommer
- Extra last från deformationer av trafiklast, F_{Qk} , tillkommer

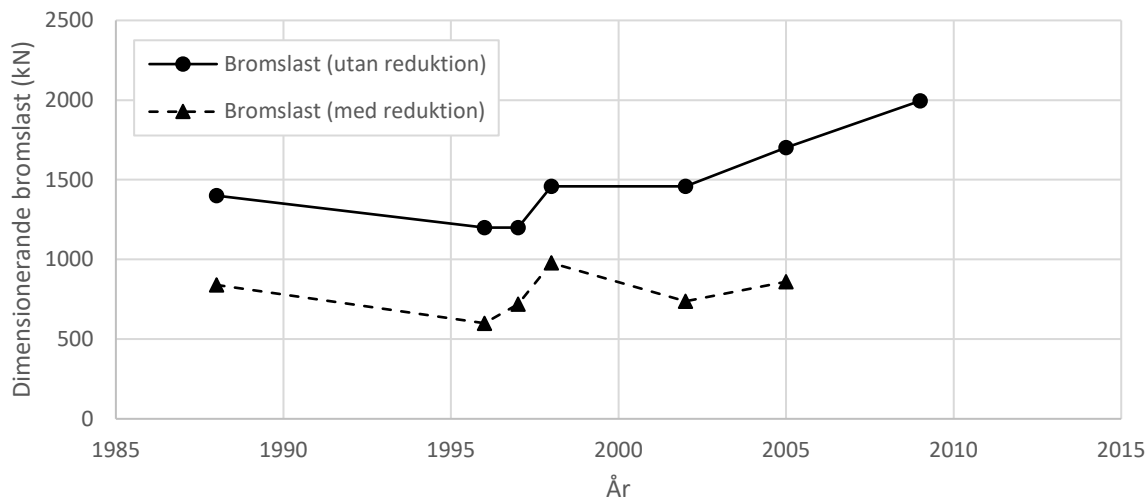
Konsulter i branschen använder ofta ovanstående reduktion men inte de tillkommande lasterna.

Inverkan av bromslaster beskrivs också i typfallet Broar över Höje å i avsnitt 2.3.2.

Tabell B.2. Beräknade dimensionerande värde på vertikal- och horisontallast på en bro med längden 45 meter lång bro. Bromslasten anges med och utan reducering.

År	Bronorm	Tåglast	Vert. last $V_{tåg}$ [kN]	Bromslast $H_{broms,0}$ [kN]	Reduktion ¹ ΔH [kN]	Bromslast $H_{broms,red}$ [kN]
1988	Tåglast 89	UIC 71	5723	1400	400	840
1996	BV Bro (utg. 1-2)	UIC 71	5723	1200	500	600
1997	BV Bro (utg. 3-4)	UIC 71	5723	1200	400	720
1998	1998 års provisoriska lastbestämmelser	LM2000	7770	1458	400	978
2002	BV Bro (utg. 5-6)	BV2000	7792	1458	600	738
2005	BV Bro (utg. 7-9)	BV2000	7792	1701	600	861
2009	Eurokod	LM71	8156	1995	TBI analys erfordras ²	

1 - Reduktion av bromslast för bro med ballast och helsvetsade räler, 2 – För broar längre än 40 m krävs en TBI analys för att räkna fram en reduktion



Figur B.7. Beräknade dimensionerande värden för bromslasten för olika normer med och utan reduktion. För Eurokod har ingen lastreduktion räknats fram eftersom bron är längre än 40 m samt att en TBI analys krävs

B.3 Vägtrafiklaster i Eurokod jämförda med typfordon och bärighetsklassning

Vägbroar i Sverige dimensioneras för två olika typer av laster:

- Lastmodeller enligt Eurokod 1991-2:2003 (LM1-LM4)
- Typfordon enligt TSFS 2018:57, 11 kapitlet §2

Eurokodlastmodellen LM1 beskrivs i avsnitt B.2.2, Figur B.3.

Typfordonen definieras med axeltryck A (=180 kN) och boggitryck B (=300kN) samt en jämnt fördelad last q (=5 kN). Typfordonen beskrivs även med 14 olika lastkonfigurationer (a-n), som beskrivs i TSFS 2018:57.

Svenska vägnätet och broar delas in i bärighetsklasserna BK1, BK2, BK3 och BK4. Vid verifiering av bärighet (bärighetsklassning) för befintliga broar används de karakteristiska värden för axeltryck A, boggitryck B och utbredd last q som visas i Tabell B.3. Dessa kan ses som mått på de laster som ger tillräcklig säkerhet med hänsyn till aktuell trafik på vägnätet.

Tabell B.3. Karakteristiska lastvärden vid bärighetsklassning av befintliga broar

Bärighetsklass	Axeltryck A (kN)	Boggitryck B (kN)	Utbredd last q (kN/m)
BK1	120	180	5
BK2	100	160	
BK3	80	120	
BK4	120	180-210 ¹	

1 – Enligt Trafikverket kan boggitrycket B för BK4 variera mellan 180-210 kN beroende på brotyp och spännvidder (enligt beslut TRV 2018/113)

I Tabell B.4 jämförs axel- och boggitryck angivna för BK4 med motsvarande värden för de typfordon som används för nya broar. Slutsatsen är att nya broar för närvarande dimensioneras för laster som är 43-67% större än de laster som kan anses ge tillräcklig säkerhet med hänsyn till allmän trafik på

vägnätet. Det kan emellertid vara relevant att nya broar byggs med en marginal för framtida lastökningar, överbelastade fordon samt specialtransporter, även om det finns ytterligare inbyggda, signifikanta säkerhetsmarginaler i gällande konstruktionsregler. Notera att jämförelsen i Tabell B.4 kan vara något missvisande eftersom lastvärdena vid bärighetsklassning appliceras via ett stort antal (alltför?) komplicerade fordonskonfigurationer. Nedan görs en mer adekvat jämförelse av lasteffekter som kan uppstå.

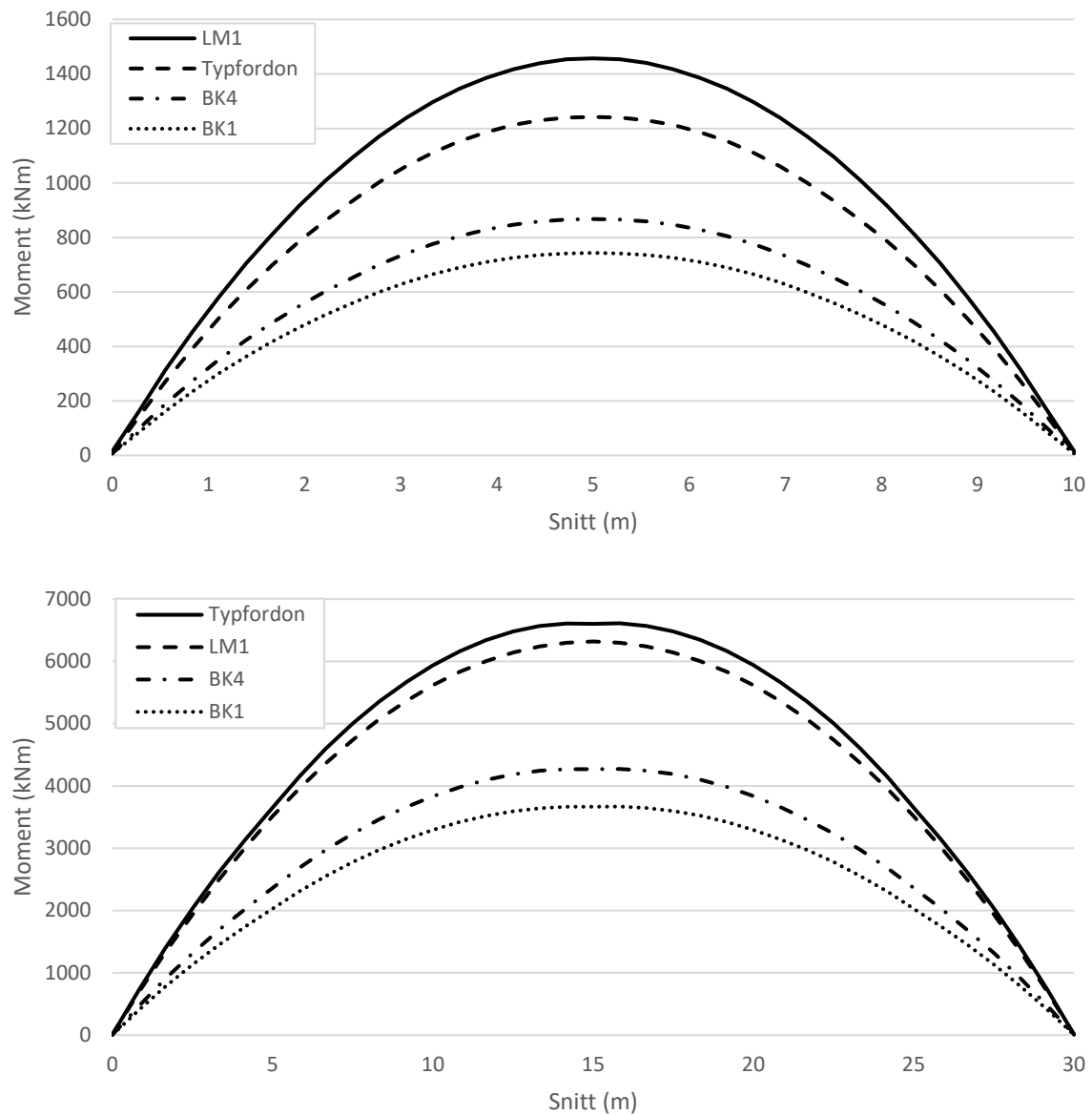
Tabell B.4. Jämförelse mellan axel- och boggitryck för bärighetsklassning BK4 samt motsvarande laster för typfordon

	Axeltryck A (kN)	Boggitryck B (kN)	Utbredd last q (kN/m)
Typfordon för nya broar	180	300	5
Bärighetsklassning BK4	120	180-210	5
Förhållande Typfordon/BK4	150%	143-167%	100%

En jämförande beräkning för trafiklaster enligt Eurokod (LM1), från Typfordon för nya broar samt vid bärighetsklassning för klasserna BK1-4 har utförts. Beräkningarna är utförda för en fritt upplagd bro med spännvidd 10 m alternativt 30 m. Resultat i form av karakteristiska böjmoment visas i Tabell B.5 och Figur B.8.

Tabell B.5. Karakteristiska böjmoment i fältmitt på en fritt upplagd vägbro med 10m och 30m spännvidd

Trafiklast	Spännvidd 10 m			Spännvidd 30 m		
	M_{k,fält} [kNm]	Jämf. med typfordon	Jämf. med BK4	M_{k,fält} [kNm]	Jämf. med typfordon	Jämf. med BK4
Typfordon	1 242	100%	143%	6 605	100%	155%
Eurokod LM1	1 457	117%	168%	6 321	96%	148%
BK1	743	60%	86%	3 666	56%	86%
BK2	661	53%	76%	3 263	49%	76%
BK3	496	40%	57%	2 462	37%	58%
BK4	868	70%	100%	4 269	65%	100%



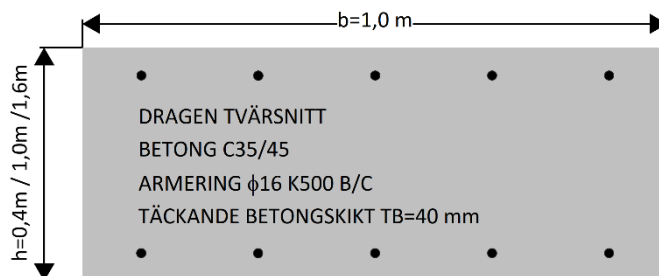
Figur B.8. Karakteristisk böjmomentfördelning för en fritt upplagd vägbro med (övre) 10m och (nedre) 30m spännvidd

Slutsatser från jämförelserna är:

- För kortare spännvidder runt 10 meter är Eurokodlasten dimensionerande
- För längre spännvidder över 25 - 30 meter är typfordonen dimensionerande
- Laster för dimensionering av nya broar ger i detta fall 55-68 % högre lasteffekt än högsta bärighetsklass BK4 vilket är av samma storleksordning som redovisades i avsnitt B3 för axel- och boggitryck.

B.5 Minimiarmering

Minimiarmering enligt nuvarande svenska regelverk i kapitel 3 har beräknats baserat på tvärsnittet som visas i Figur B.9. Tvärsnittet betraktas som draget, med hänsyn till ospecificerade tvångskrafter som förutsätts motverkas genom att lägga in minimiarmering enligt olika normregler.



Figur B.9. Illustration av tvärsnitt och förutsättningar som använts vid beräkning av minimiarmering.

Följande krav och regler har använts i beräkningen (A_s avser minimiarmering per sida):

TRV krav (Trafikverket/Vägverket/Banverket, t.ex. TRVK Bro 11, Bro 2004, BV Bro 9)

- $A_s \geq 4,0 \text{ cm}^2/\text{m}$
- $A_s \geq 4 \cdot \frac{f_{ctk}}{2}$ resp. $A_s \geq 4 \cdot \frac{f_{ctm}}{3}$
- $A_s \geq 0,05 \cdot d$ med $f_{ctm} = 1,5 \cdot f_{ctk} = 1,5 \cdot 2,1 \text{ MPa} = 3,2 \text{ MPa}$

BBK04 (Boverket)

- $A_s \geq \frac{A_{ef} \cdot f_{cth}}{\sigma_s}$ med $A_{ef} = b \cdot (2c + \emptyset)$
- $f_{cth} = 1,5 \cdot f_{ctk} = 3,2 \text{ MPa}$
- $\sigma_s = 420 \text{ MPa}$

EC2 (Eurokod 2, SS-EN 1992-1-1:2005)

- $A_s \geq \frac{k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff} \cdot A_{ct}}{2 \cdot \sigma_s}$ med $k_c = 1,0$
 - $k = \begin{cases} 1,0 & \text{för } h \leq 0,3\text{m} \\ 0,65 & \text{för } h \geq 0,8\text{m}^* \end{cases}$
 - $f_{ct,eff} = f_{ctm} = 3,2 \text{ MPa}$
 - $A_{ct} = b \cdot h$
 - $\sigma_s = \begin{cases} 500 \text{ MPa} \\ 240 \text{ MPa} (w_k = 0,3 \text{ mm}) \end{cases}$
- *Övre värdet för k har justerats i vissa författningssamlingar

Minimiarmering för sprött brott (kapitel 9 i SS-EN 1992-1-1:2005) har inte beaktats. Detta kontrolleras implicit av konstruktören under dimensioneringen, se även råd i till exempel EKS 10, Stycke 9.2.1.1(1) Anm. 2.

Bilaga C 2D vs 3D modellering

C.1 Beskrivning av analyserad bro

Bron är en öppen slakarmerad plattrambro för vägtrafik som konstruerades 2020, se Figur C.1. I denna bilaga jämförs den byggda brons verkliga armeringsmängd med fiktiva armeringsmängder som fås med olika analysmetoder och sätt att tolka resultat. Elevations- och planritningar för bron visas i Figur C.2.



Figur C.1. Foto av plattrambro konstruerad och byggd 2020.

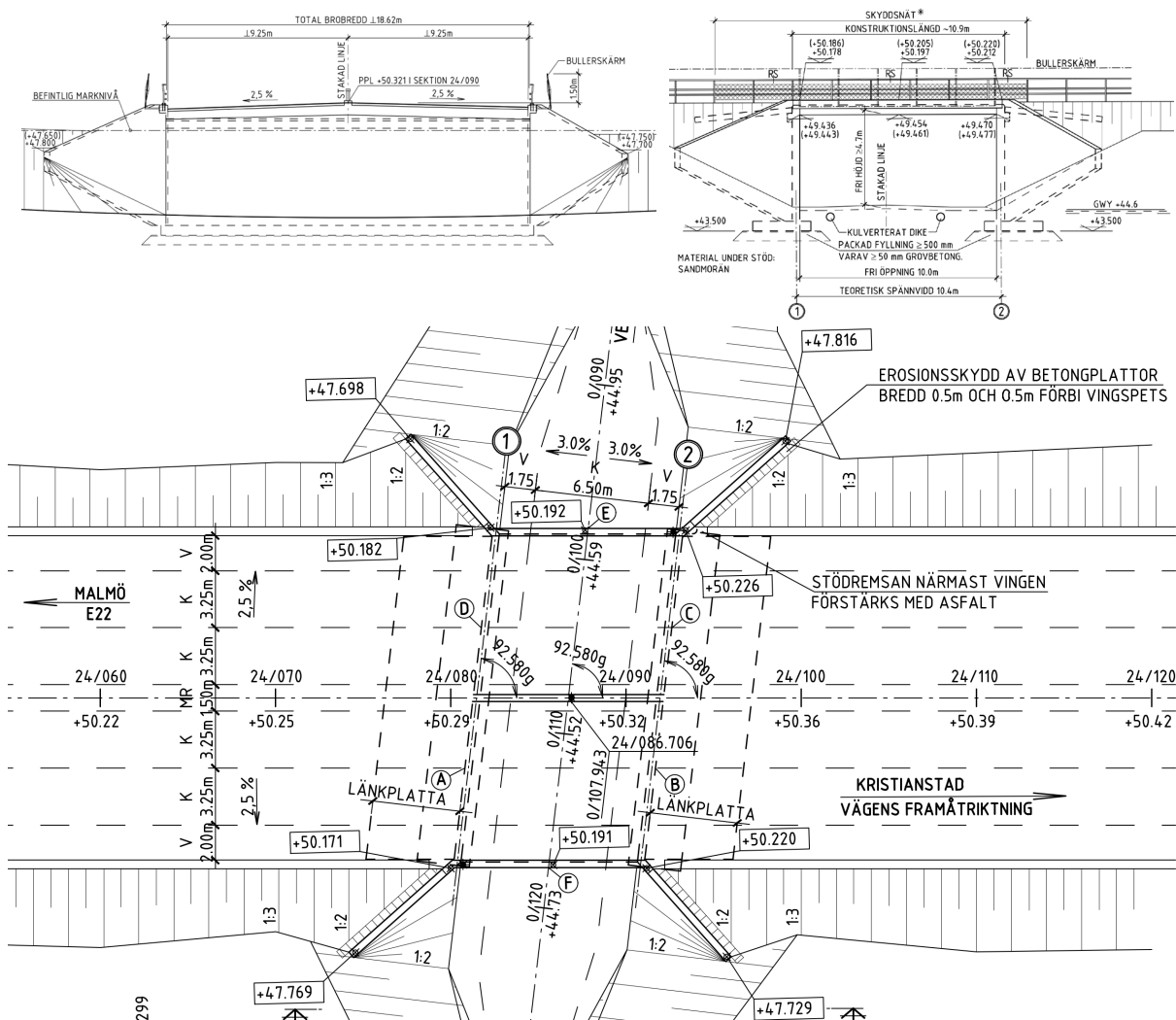
Bron har en spännvidd på 10,4 m, delade bottenplattor och är grundlagd på friktionsjord (Sandmorän, $\phi_k=35^\circ$).

Trafikverket kräver att byggnadsverkets verkningsätt i sin helhet ska beaktas i dimensioneringen. Detta innebär i praktiken att även enklare konstruktioner som plattrambroar beräknas i 3D. Analysen utfördes med en 3D skalmodell. En relativt omfattande optimering av armeringsutförande utfördes, och samtidigt utformades armeringen i samråd med entreprenören produktionsvänlig. I projektet fanns ett samförstånd mellan entreprenören och konstruktören att mängderna skulle optimeras och det fick lov att kosta tid.

Regelverk som användes vid projekteringen av den byggda bron redovisas i Tabell C.1 och samma normregler användes i de jämförelser som beskrivs nedan.

Tabell C.1. Normregler som använts för den aktuella bron.

	Ny bro
Betong	Eurokod 2
Trafikverket	KRAV Brobyggande (2016) TRVK Geo 13 (2013)



Figur C.2. Elevations- och planritningar för plattrambron i Figur C.1

C.2 Jämförelser med alternativa analysmetoder

Jämförelsen fokuserar på den mängd armering som fås utifrån dimensioneringar med olika modelleringsätt och tolkningar. Armering i den befintliga bron dimensionerades på basis av följande principer:

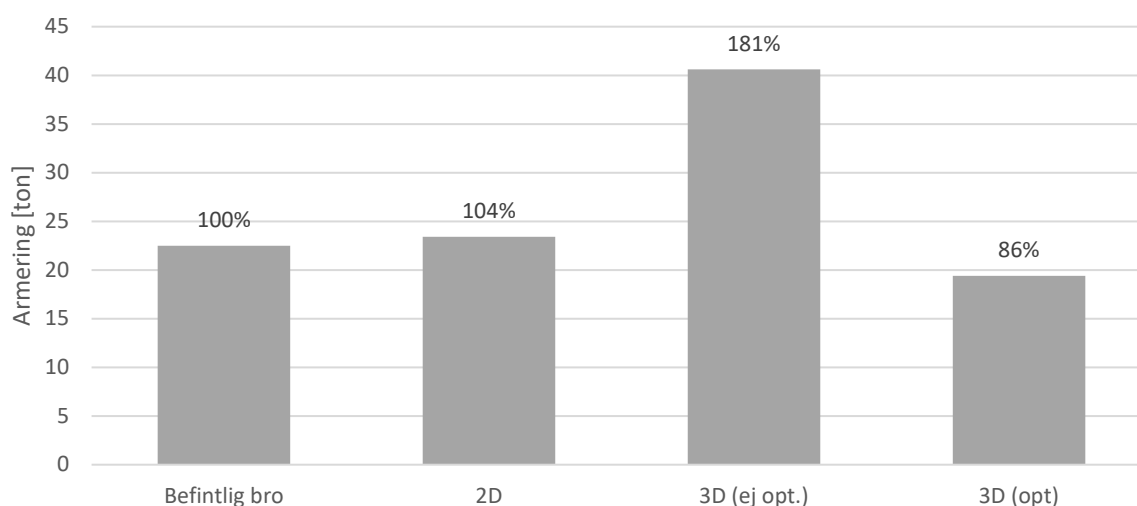
- Dimensionering i brons bärriktning baseras på 3 utjämningsstrimlor.
- Vald armering följer kurvan för armeringsbehovet, men har produktionsanpassats för att underlätta armeringsutförande.
- Dimensionering i tvärled med reduktion av tvång baserades på Betongföreningens handbok till Eurokod 2 (Volym I), 7.3.4. (Betongföreningen 2010)

Ytterligare tre fullständiga dimensioneringar av bron har utförts för att undersöka skillnader i armeringsmängd mellan olika analysmetoder och metodik för efterbearbetning av resultat. Bottenplattorna har exkluderats i jämförelsen (beräknas med handberäkningsmetoder och ger ungefär samma resultat för alla analyser). Metodiken som användes för de tre olika varianterna

sammanfattas i Tabell C.2. Resultat i form av mängd armering för dessa alternativa varianter samt för den byggda bron redovisas i Figur C.3.

Tabell C.2. Beskrivning av alternativa analysmetoder med metodik för efterbearbetning av resultat.

2D	• Dimensionering i bärriktningen baseras på en meterstrimla. • Vald armering följer kurvan för armeringsbehovet. • Dimensionering i tvärled baseras på minimiarmering enligt Krav brobyggande med komplettering vid inspänning mot vinge.
3D -ej optimerad	• Dimensionering i bärriktningen baseras på resultat från ett snitt taget 0.2m från kant (ingen utjämning). • Vald armering enligt maximalt armeringsbehov. • Dimensionering i tvärled utan reduktion av tvång
3D-optimerad	• Dimensionering i bärriktningen baseras på 11 utjämningsstrimlor längs med bron, se Figur 4.4. • Vald armering följer kurvan för armeringsbehovet. • Dimensionering i tvärled med reduktion av tvång. • Ingen produktionsanpassning.



Figur C.3. Total mängd armering i bron beroende på metodik vid projektering

C.3 Sammanfattning och slutsatser

Analys i 2D och 3D kan ge liknande armeringsmängder. 3D analysen resulterar i en armeringsfördelning som är gynnsammare när det gäller uppsprickning vid extrema trafiklaster. Det bör dock diskuteras om detta är relevant. Det är sprickorna som uppkommer under permanent last som kan ge upphov till korrosionsproblem.

3D analys kan uppfattas ha en högre noggrannhet, som dock i stor utsträckning är skenbar eftersom föreskrivna laster som används som indata är idealiserade, schematiska och i många fall grovt

uppskattade. Ett tydligt exempel på detta är laster från tvång genom temperaturdifferenser i konstruktionen, se Gottsäter (2019).

Hantering av tvång och optimering är styrande faktorer för den slutgiltiga armeringen i bron. Hantering av tvång skapar omfattande extra arbete för konstruktören. Det finns förslag på hur tvång kan beaktas i konstruktionsprocessen, men konstruktören tar en viss risk för problem i granskningsprocessen när man reducerar tvånget. Om det finns tidspress i ett projekt kan detta leda till att en konstruktör väljer att avstå från detta.

Optimeringen är väldigt tidskrävande och måste också ta hänsyn till produktionsanpassning av armeringsutformningen. Det kan lätt bli en fördubbling av arbetet. För att skapa en beteendeförändring krävs ekonomiska incitament, t.ex. genom att sätta pris på CO₂-utsläpp.

Bilaga D Tidiga skeden i väg- och järnvägsprojekt

D.1 Åtgärdsvalsstudie (ÅVS)

Alla formella planeringsprocesser ska föregås av en åtgärdsvalsstudie. Initiativtagare till en åtgärdsvalsstudie kan vara Trafikverket, en kommun, en region eller en annan aktör. Varje år genomförs omkring 200 åtgärdsvalsstudier, varav många små studier.

En åtgärdsvalsstudie är ett arbetssätt som grundar sig på dialog med bland annat kommuner och regioner. Studien görs tidigt i planeringen för att man tillsammans ska få en helhetsbild och hitta hållbara förslag på åtgärder.

Åtgärdsvalsstudier tar hänsyn till alla trafikslag, alla typer av åtgärder och kombinationer av dessa. Val av åtgärder handlar om att lösa problem och tillgodose behov. Valen skall bidra till en hållbar samhällsutveckling genom kostnadseffektiva åtgärder.

Tidig dialog skall leda till delat ansvar och samsyn kring tänkbara lösningar. I samverkan mellan flera aktörer kompletterar deltagarnas kunskaper och erfarenheter varandra. Genom att analysera problemen noggrant har man större möjlighet att skapa synergieffekter i transportsystemet.

En åtgärdsvalsstudie är ett arbetssätt som sker i olika faser. Det är studier baserade på dialog och med tydlig dokumentation. Följande faser ingår:

- Initiera
- Förstå situationen
- Pröva tänkbara lösningar
- Forma inriktning och rekommendera åtgärder

D.2 Väg-/järnvägsplan

Planen beskriver i detalj var järnvägen/vägen ska ligga och hur anläggningen skall utföras. Planen visar vilken mark som behövs både för själva bygget av järnvägen och för det permanenta intrång som anläggningen kräver.

I vissa projekt beskrivs och utvärderas alternativa korridorer för den framtida anläggningen. En lokaliseringsutredning skall säkerställa en lokalisering som är lämplig med hänsyn till ändamålet, som ska kunna uppnås med minimalt intrång och olägenhet samt utan oskälig kostnad.

Regeringen beslutar i vissa projekt om tillåtlighet för projektet och vilken korridor som ska utredas vidare. För verksamheter som omfattas av 17 kap. 1 § miljöbalken gäller en obligatorisk tillåtlighetsprövning av regeringen.

Trafikverket bedömer genom tillåtlighetsprövning bland annat avvägningar mellan enskilda och allmänna intressen som berörs och hur planen överensstämmer med lagstiftningens krav på att intrång och olägenheter ska minimeras.

Bilaga E Industriworkshop

E.1 Mål och upplägg

En industriworkshop arrangerades den 4:e november 2024 i Lund där personer från Sveriges brobyggnadsindustri bjöds in. Huvudmålet med workshoppen var att samla in industriperspektiv och erfarenheter för att belysa huvudfrågorna i projektet. Upplägget byggde på tre diskussionsfrågor som distribuerades till deltagarna inför workshoppen:

1. Har ni erfarenhet av broprojekt där optimering av materialåtgång kraftigt försvårades? Vilka var anledningarna?
2. Har ni erfarenhet av broprojekt där materialoptimering fungerade bra? Vilka faktorer möjliggjorde detta?
3. Vilka åtgärder kan vidtas för att undvika resursslöseri i framtiden? Hur ser ni på olika aktörers roll (i olika skeden)?

Workshoppen hölls i en aktiv lärosal med gruppbord för att möjliggöra diskussioner. En stor del av tiden ägnades åt aktiva diskussioner i mindre grupper. Diskussionerna modererades av deltagare i forskningsprojektet och moderatorerna samlade in svar från varje bord, vilka delades i plenum med samtliga deltagare. Insamlade synpunkter från workshoppen diskuterades senare inom projektets arbetsgrupp och de viktigaste slutsatserna noterades.

E.2 Resultat

E.2.1 Deltagare

Totalt deltog 35 personer där olika industriaktörer var representerade i följande andelar brokonsulter (43%), entreprenörer (31%) och beställare (17%). Ett fåtal personer från akademien deltog också (9%). Deltagarna delades in i grupper om 5 till 6 och för att stimulera diskussion samt samla in resultat fanns en person från projektets arbetsgrupp representerad vid varje bord. Totalt blev det sex diskussionsbord.

E.2.2 Diskussion 1 – möjliga anledningar till ökad materialåtgång

Första diskussionsfrågan handlade om att diskutera verkliga exempel där deltagarna själva ansåg att materialåtgången var för hög. Syftet var att identifiera olika orsaker till en ökad materialåtgång. Flera orsaker lyftes fram inklusive förändringar i regelverk och modelleringsmetodik, otillräcklig materialoptimering delvis på grund av höga arbetskostnader, alltför teoretisk utbildning, och problem med utländska konsulter. Tidsbrist, dåliga initialdata och oflexibel projektplanering betonades också. Dessutom nämndes problem med komplexa och svårtolkade regelverk, klimatberäkningar och upphandlingsformer, svårigheter med komplex geometri samt korta byggtider, som orsaker till brist på optimering av materialåtgång.

E.2.3 Diskussion 2 – faktorer som möjliggör minskad materialåtgång

I den andra diskussionen ville vi att deltagarna delade med sig av positiva exempel på materialbesparingar. För att minska materialåtgången i brobyggande nämndes att man måste våga identifiera alternativa utföranden som kan vara dyrare men är mer effektiva. Incitamentssystem för att premiera smarta lösningar, till exempel genom miljöbonusar, är också viktiga. En del tyckte att beställare bör ha modet att avvika från konstruktionsregler vid behov och ge dispens. I respons till

just den punkten lyftes fram att ett sådant system finns men att det är få som använder den. Det lyftes också fram att det är avgörande att engagera erfarna ingenjörer i tidiga skeden samt främja ett bra samarbete mellan beställare och utförare (konsulter och entreprenörer) med incitament att arbeta mot gemensamma mål. Tidiga kontakter och öppenhet mellan parter samt en bra dialog i projekten är viktiga, särskilt med hänsyn till klimatfrågor. Samverkan mellan myndigheter och aktörer från tidigt skede till färdig produkt är också nödvändigt, liksom att skapa ekonomiska incitament och prioritera enkelhet i lösningar.

E.2.4 Diskussion 3 – åtgärder för att undvika resursslöseri

Den sista diskussionspunkten hade likheter med den andra men var mer generell om hur vi som industri kan undvika onödigt resursslöseri i framtiden. Det föreslogs att granskningsprocessen bör ha mer fokus på hållbarhet samtidigt som krav på effektivare redovisning bör ställas, eftersom man menade att det idag är svårt att granska på ett vettigt sätt. Man betonade vikten av tidiga projektskeden, vilka inte enbart bör styras av miljö och gestaltning utan också inkludera konstruktionsaspekter. Möjligheten att ifrågasätta tidiga beslut nämndes också. Behov av incitament för materialbesparingar lyftes fram som en viktig faktor. Till slut betonades att det är väldigt viktigt att det finns tillit inom branschen eftersom detta är en utmaning som berör alla och där alla behöver vara aktiva för att åstadkomma förändring till det bättre. Detta inkluderar utbildningssystemet, där mer fokus på materialbesparing och miljöoptimering bör lyftas in i undervisningen, där det gamla mantrat 'alltid på säkra sidan' inte längre duger.

E.3 Viktiga slutsatser

Workshoppen uppfyllde syftet att fånga in industriperspektivet och få ytterligare stöd i hur vi kan undvika onödigt resursslöseri i framtiden. När vi jämförde resultaten med våra tidigare analyser var det mycket som stämde med det vi tidigare kommit fram till. Exempelvis var orsakerna till ökning av materialåtgång som nämndes i workshoppen i stort sett desamma som vi identifierat genom analyser av referensobjekt och i intervjuundersökningen. En ny aspekt som lyftes fram var dock den påverkan vi inom akademin har genom våra utbildningar. När det gäller faktorer som bidrar till att undvika resursslöseri var resultaten också i linje med våra tidigare analyser. En positiv reflektion från projektgruppen efter industriworkshoppen var den tydliga viljan från alla deltagare att hantera de problem som har lyfts fram i detta forskningsprojekt. Vi har tidigare noterat en tendens hos några aktörer att fokusera på frågan om skuld, dvs vems fel det är. Det var mycket positivt att i workshoppen undvek man detta. I stället lyftes flera gånger fram att alla, inklusive akademin, beställare, konsulter och entreprenörer, har ett ansvar.

Bilaga F Intervjuundersökning

I projektet genomfördes en intervjuundersökning med olika typer av experter inom anläggningsbranschen. Sammanlagt intervjuades 15 personer, vardera under ca en timme. Samtliga intervjuer gjordes via Teams och spelades in för senare transkribering. Intervjuerna genomfördes under 2023.

Varje intervju inleddes en introduktion med bakgrundsinformation till projektet inklusive kort beskrivning av typfall som visar ökad materialförbrukning över tid. Mål med projektet redovisades. Därefter genomfördes intervjun med följande frågor som stöd:

1. Beskriv din egen bakgrund och erfarenhet inom anläggningsbyggande.
2. Vilken eller vilka roller har du haft? Beställare? Projektering? Entreprenör? Annat?
3. Är bilden av ökad resursåtgång korrekt? Stämmer den med din erfarenhet och egen uppfattning?
4. Om svaret är ja, vad är den främsta orsaken enligt din uppfattning?
5. Din bild av förändringar som skett över tid vad gäller?
 - Regelverk och normer?
 - Arbetsätt och processer i projektering och byggande? Entreprenadformer?
 - Beställarfunktion?
 - Annat?
6. Vad kan man enligt din uppfattning göra i framtiden för att få bättre resursutnyttjande och lägre klimatavtryck?
7. Kan vi ange ditt namn i en lista på intervjupersoner när vi rapporterar resultatet utan att vi kopplar ditt namn till specifika svar.

Bakgrundsinformation och frågor skickades ut i förväg till intervjupersonerna.

Intervjupersonerna kan grovt hänföras till följande huvudkategorier och har genomgående stor erfarenhet

- | | |
|---------------------------------|------|
| • Beställare/regelansvariga (B) | 4 st |
| • Konstruktörer/geotekniker (K) | 7 st |
| • Entreprenörer(E) | 4 st |

Namn på intervjupersonerna redovisas i Tabell F.1.

Som svar på fråga 3 ovan svarar i stort sett alla med enstaka undantag att man delar bilden av ökad materialåtgång i byggandet. När det gäller orsakerna till detta är det större variation, vilket är naturligt beroende på vilken roll och erfarenhet intervjupersonen har eller har haft i branschen. Men en stor majoritet av de intervjuade lyfter fram expansion av normer och regler, samt datorbaserade analyser som viktiga orsaker till ökade materialmängder.

Svaren som framkom i intervjuerna har generellt varit viktiga för arbetet i projektet genom att de gett goda insikter och bidragit till prioriteringar av arbetet. I huvudrapporten ovan hänvisas på ett antal ställen till intervjuundersökningen när olika aspekter diskuteras.

Tabell F.1. Intervjuade experter

Namn	Företag, organisation	Kategori
Ebbe Rosell	Trafikverket	B
Kurt Palmqvist	Trafikverket	B
Carl Magnus Krona	Trafikverket	B
Lennart Askling	Trafikverket	B
Per Evert Bengtsson	Statens Geotekniska Institut	K
Fredrik Thunström	InHouse Tech AB	K
Torben Forsberg	Forsbergs, DK	K
Anna Jacobsson	Tyréns	K
Leif Jendeby	COWI	K
Peter Collin	Eget företag/tidigare Ramböll	K
Claes Bergsten	Sweco	K
Jörgen Flink	NCC	E
Martin Laninge	Peab	E
Anders Söreklint	NCC	E
Oskar Bruneby	Kreera AB	E