

Förstudie till FoU-ramprojekt

Dimensionering av tunnlar

Förord

Föreliggande förstudie "Dimensionering av tunnlar" behandlar hur nya vägtunnlar ska dimensioneras för att möta de krav som ställs idag och i framtiden. Dessa omfattar såväl samhällets som brukarnas och övriga intressenters krav.

Inom förstudien ingår två litteraturstudier/kunskapsinventeringar. Dessa biläggs föreliggande förstudie.

Borlänge 2002-01-31

I arbetsgruppen har följande personer medverkat:

Per Andersson

Bernt Freiholtz

Katarina Kieksi

Samir Redha

Ebbe Rosell

Ove Sundmark

Innehåll

Förord.....	2
Innehåll	3
Sammanfattning	4
1 Introduktion	8
1.1 Bakgrund.....	8
1.2 Syfte	8
1.3 Avgränsning.....	9
1.4 Begrepp.....	10
2 Krav på en tunnel.....	12
2.1 Vägnätet.....	12
2.2 Övergripande krav på en tunnel.....	12
2.3 Bärförmåga	13
2.4 Brandsäkerhet	14
2.5 Övriga väsentliga krav	14
2.5.1 Hälsa och miljö	14
2.5.2 Säkerhet vid användning.....	15
2.5.3 Skydd mot buller.....	15
2.5.4 Energihushållning och värmeisolering	15
2.5.5 Lämplighet för avsett ändamål	15
2.5.6 Tillgänglighet och användbarhet för personer med nedsatt rörelse- eller orienteringsförmåga	15
2.5.7 Hushållning med vatten och avfall	16
3 Dimensioneringsprocessen	17
3.1 Uppdelning.....	17
3.2 Krav	17
3.3 Förutsättningar	18
3.4 Verifiering.....	18
3.5 Kontroll.....	18
3.6 Uppföljning	18
4 Dimensionering av	20
4.1 Bärförmåga	20
4.1.1 Principer.....	20
4.1.2 Beständighet.....	24

4.1.3	Bergtunnel.....	24
4.1.4	Betongtunnel.....	35
4.1.5	Inredning och installationer	39
4.2	Brandskydd	40
4.2.1	Problem.....	41
4.2.2	Utförd och pågående FoU.....	44
4.2.3	Behov av FoU	47
4.3	Miljö och hälsa.....	49
4.3.1	Problem.....	49
4.3.2	Utförd och pågående FoU.....	49
4.4	Utformning och säkerhet vid användning.....	50
4.5	Buller och vibrationer	51
4.6	Energiushållning	51
4.7	Tillgänglighet.....	52
5	Förslag till angelägna FoU-projekt.....	53
5.1	Bärförmåga - Bergtunnlar.....	53
5.2	Bärförmåga – Betonginklädda tunnlar.....	56
5.3	Inredning och installationer	59
5.4	Brandskydd	59
5.5	Miljö och hälsa.....	63
5.6	Utformning och säkerhet	63
5.7	Buller och vibrationer	63
5.8	Energiushållning	64
5.9	Tillgänglighet.....	64
6	Referenser	65

Bilagor:

Bilaga 1: ”Dimensionering av tunnlar – brandaspekter”, Haukur Ingason, SP-Brandteknik, 2000.

Bilaga 2: ”Dimensionering av tunnlar – brandaspekter, litteraturstudie åt Vägverket av Brandskyddslaget 2000-12-01”, Staffan Bengtsson och Hans Nyman, Brandskyddslaget, 2000.

Sammanfattning

Föreliggande rapport utgör en sammanställning av problemområdet "Dimensionering av tunnlar". Förstudien behandlar hur nya vägtunnlar ska dimensioneras för att möta de krav som ställs idag och i framtiden. Dessa omfattar såväl samhällets som brukarnas och övriga intressenters krav.

Byggnadsverket tunnel är en mycket komplex teknisk anläggning där förutom kravet på trafikfunktionen även andra krav såsom hållfasthet, säkerhet, hälsa och begränsning av miljöstörning uppfylls genom samverkan mellan ett antal tekniska funktioner. Samtidigt kan konsekvenserna av ett fel i någon av dessa funktioner i det delvis slutna tunnelutrymmet leda till svåra konsekvenser för trafikanternas säkerhet.

Dimensionering av tunnelns tekniska anläggningar måste ske med stor omsorg eftersom en förändring av någon komponent i anläggningen ofta får återverkan på andra komponenters funktion.

Kunskapen om hur olika val som sker tidigt i planerings- och projekteringsprocessen påverkar en tunnels möjlighet att uppfylla olika sorters krav är otillräcklig. Mer systematiska och likartat tillämpade dimensioneringsprocesser är därför viktiga element för att säkra måluppfyllelsen.

Att dimensionering utförs likartat och konsekvent har stor betydelse för totalekonomin, både på kort och på lång sikt, eftersom de påverkar beständighet och underhålls-, reparations- och ombyggnadsbehov etc. Detta är speciellt accentuerat för tunnlar eftersom åtgärder i tunnelutrymmet generellt är mer kostnadskrävande än åtgärder på andra vägbyggnadsverk. Tillkommande är också att tillgängligheten för drifts- och underhållsinsatser normalt är starkt begränsade för vägtunnlar, på grund av de utmaningar som temporära trafikomläggningar innebär.

FÖRSLAG TILL ANGELÄGNA FoU-PROJEKT

För att kunna göra en övergripande ekonomisk sammanvägning av nyttan och kostnaderna för olika krav för en tunnel erfordras inledningsvis att befintliga LCC-modeller utvecklas. För en framgångsrik LCC-analys krävs relevanta grund/indata för de konstruktioner och konstruktionsdelar som förekommer i en tunnel.

På sikt är det nödvändigt att pågående FoU-insatser på LCC-området utvecklas mot en anpassning mot byggnadsverket tunnel, där generella indata analyseras (exempelvis anläggnings-, drifts- och underhållsdata) och modelleras för några vanliga konstruktionselement i tunnlar.

Enligt avgränsningen av denna förstudie, se kapitel 1.3, så har denna förstudie resulterat i detaljerade förslag till FoU-insatser inom områdena bärförmåga och brandskydd. I denna sammanfattning anges nedan enbart rubrikerna på områden där FoU-insatser bedöms som nödvändiga för att erhålla kostnadseffektiva konstruktioner med bibehållen säkerhet. För den fullständiga redogörelsen av de föreslagna FoU-insatserna hänvisas till kapitel 5.

Bärförmåga – Bergtunnlar

- Sannolikhetsbaserad dimensionering
- Stålfiberarmerade sprutbetongkonstruktioner
- Injekterings förstärkande verkan
- Bruksgränsdimensionering
- Explosionslaster i bergtunnlar
- Skadezonstabell

Bärförmåga – Betonginklädda tunnlar

- Modell för analys av last från överliggande bergmaterial
- Modell för analys av vattentryck vid dränerade förhållanden
- Dimensionering för ”extrem blocklast”
- Lokalt verkande is- och/eller tjältryck
- Inspektionsmöjlighet
- ”Vattentät betong”
- Dimensionering av betongkonstruktion för explosionslast

Inredning och installationer

- Inklädnad
- Vägkonstruktion

Brandskydd

- Branddimensionering/ brandlaster
- Branddimensionering/ avspjälkning av betong vid brand
- Branddimensionering enligt Eurocodes
- Materialval
- Brandskydd/ branddetektion
- Brandskydd/ brandbekämpning

- Brandskydd/ aktivt brandskydd
- Brandskydd/ brandgasventilation - brandgaskontroll
- Brandskydd/ Utrymning

Enligt avgränsningen av föreliggande förstudie så har endast en övergripande diskussion förts avseende FoU-behov gällande dimensionering av ”Miljö och hälsa”, ”Utformning och säkerhet”, ”Buller och vibrationer”, ”Energihushållning” och ”Tillgänglighet”. För en mer utförlig redogörelse av denna diskussion hänvisas till kapitel 5.

1 Introduktion

1.1 Bakgrund

Byggnadsverket tunnel är en mycket komplex teknisk anläggning där förutom kravet på trafikfunktionen även andra krav såsom hållfasthet, säkerhet, hälsa och begränsning av miljöstörning uppfylls genom samverkan mellan ett antal tekniska funktioner. Samtidigt kan konsekvenserna av ett fel i någon av dessa funktioner i det delvis slutna tunnelutrymmet leda till svåra konsekvenser för trafikanternas säkerhet.

Dimensionering av tunnelns tekniska anläggningar måste ske med stor omsorg eftersom en förändring av någon komponent i anläggningen ofta får återverkan på andra komponenters funktion.

Kunskapen om hur olika val som sker tidigt i planerings- och projekteringsprocessen påverkar en tunnels möjlighet att uppfylla olika sorters krav är otillräcklig. Mer systematiska och likartat tillämpade dimensioneringsprocesser är därför viktiga element för att säkra måluppfyllelsen.

Att dimensionering utförs likartat och konsekvent har stor betydelse för totalekonomin, både på kort och på lång sikt, eftersom de påverkar beständighet och underhålls-, reparations- och ombyggnadsbehov etc. Detta är speciellt accentuerat för tunnlar eftersom åtgärder i tunnelutrymmet generellt är mer kostnadskrävande än åtgärder på andra vägbyggnadsverk. Tillkommande är också att tillgängligheten för drifts- och underhållsinsatser normalt är starkt begränsade för vägtunnlar, på grund av de utmaningar som temporära trafikomläggningar innebär.

Kännetecknande för en tunnel är att den oftast är den kostnadsmässigt dominerande delen i ett vägvagnsnitt. Dessutom är kostnadsspannet mycket stort mellan en lågtrafikerad bergtunnel och en högtrafikerad betongtunnel i stadsmiljö. Ur kostnadseffektivitetssynpunkt bör därför dimensioneringen ske med stor precision samtidigt som ett stort antal parametrar måste beaktas.

Förstudien till ramprojektet Dimensionering av tunnlar, littera SVT:11, ingår i Vägverkets FoU-plan 2000-2002.

1.2 Syfte

En tunnels förmåga att uppfylla de övergripande kraven påverkas i hög grad av hur effektiv dimensioneringsprocessen är.

Genom att systematiskt utreda hur processen genomförs för de olika funktionskraven kan processerna justeras och det kan därigenom säkerställas att en slutligt optimal lösning erhålls. I ett mellansteg kan analysen leda till att svaga led i projekteringen kan identifieras och åtgärdas.

Resultaten av FoU-ramprojekten ska införas i de generella kravspecifikationerna, ATB-erna.

1.3 Avgränsning

I föreliggande förstudie anges de krav som ställs avseende dimensionering på våra vägtunnlar. Inledningsvis är studien mycket bred. Avsikten är att få ett vidare perspektiv så att jämförelse mellan olika teknikområden kan ske.

Förstudien detaljeras enbart inom områdena bärförmåga och brandskydd. Beständighetsaspekterna hanteras, till övervägande del, under ramprojektet Optimala standarder, littera SVT:12, i Vägverkets FoU-plan 2000-2002. Ett antal beständighetsaspekter, exempelvis bruksgränsdimensionering kommer dock på ett övergripande sätt att behandlas i föreliggande förstudie.

Frågeställningar associerade med täthet (inläckage och fukt/droppande vatten) och frostsäkring av vägtunnlar behandlas i förstudien "Tätning och frostsäkring av tunnlar". I förstudien "Tätning och frostsäkring av tunnlar" har följande metoder studerats; injektering (för- och efterinjektering i kombination med dräner), betonginklädnad och inklädnader med och utan frostisolering.

Krav för säkerhet vid användning har studerats och avrapporterats i förstudien "Personsäkerhet i tunnlar", 1999-03-23

Ett stort antal områden finns där förbättringar kan göras. En metod för att genomföra säkerhetsanalyser för befintliga vägtunnlar kommer att bli färdigställd under våren 2002. Se även kap 4.4

Krav för hälsa och miljö har studerats och avrapporterats i förstudien "Miljöanpassade tunnlar", 1999-12-30. I denna förstudie har endast luftföroreningar som ur hälsosynpunkt är specifika för tunnlar, dvs. endast de problem och frågeställningar som berör punktutsläpp inne i tunneln, vid tunnelmynningar och vid ventilationstorn behandlats. Arbetsmiljöaspekter i samband med byggande och drift av vägtunnlar behandlades inte heller i denna förstudie. Motivet för detta är att dessa aspekter är gemensamma för alla konstruktioner i berg.

Dimensionering av en ventilationsanläggning kommer att kunna genomföras mer exakt efter att en utredning om emissionsfaktorer och ett kriteriadokument för luftkvalitet blir färdigställd under våren 2002.

För att kunna göra en ekonomisk sammanvägning av nytta och kostnaderna för olika krav erfordras utveckling av LCC-modeller. Utveckling av LCC-modeller har behandlats dels i Vägverkets förstudie "LCC-modeller (bro)", dels i Banverkets förstudie "LCC-analys för järnvägstunnlar", 1999-10-15. Pågående FoU-insatser på brosidan är inriktat mot att utveckla ett praktiskt användbart system för analyser av livscykelkostnader, som bygger på Vägverkets databaser. På sikt är det

motiverat att pågående FoU-insatser på LCC-området utvecklas mot en anpassning mot byggnadsverken bro och tunnel.

1.4 Begrepp

Se definitioner i Tunnel 99, 1.3.2.

Anläggning: Byggnadsverk som inte är byggnad, exempel: broar, flygfält, bergrum, tunnlar, kajer, dammar, idrottsplatser, radio- och telemaster (Ur TNC 98, Tekniska basord).

Byggnad: Byggnadsverk med tak och vanligen även väggar som innehåller utrymmen avsedda för människor att uppehålla sig i (Ur TNC 98, Tekniska basord).

Byggnadsverk: Varaktig konstruktion som har stor volym och självständig teknisk funktion och som är varaktigt fäst vid marken. Ett byggnadsverk kan vara antingen byggnad eller anläggning (Ur TNC 98, Tekniska basord).

Design: Internationellt använd term för formgivning, dvs. gestaltning av hantverkligt eller industriellt framställda produkter och miljöer (Ur Nationalencyklopedins ordbok, 1999).

Dimensionering: Fastställande av de dimensioner eller den kapacitet som en byggnads- eller maskindel, en väg eller ett kommunikationsmedel bör ha med hänsyn till givna normer och ställda krav. Den kan utföras empiriskt eller teoretiskt. Numera används oftast datorbaserad dimensionering, en ingenjörsvetenskap i vilken en dator används för att förutsäga ett systems uppförande, så att de parametrar kan bestämmas som ger systemet de önskade egenskaperna. (Ur Nationalencyklopedin, 1998).

Förutsättning: (Antagen) omständighet som utgör en nödvändig grund (Ur Nationalencyklopedins ordbok, 1999).

Konstruktion: Beräkning och dimensionering av anläggning e.d.; även resultat härav (Ur TNC 73: Bergteknisk ordlista).

Verksamhet som omfattar beräkning och dimensionering av produkter (Ur TNC 98, Tekniska basord).

Kontroll: Undersökning för att fastslå om ett objekt beträffande en eller flera egenskaper fyller givna krav. (Ur TNC 95, Plan- och byggtermer 1994 och TNC 98, Tekniska basord). Karaktäristiskt för kontroll är ett beslut om huruvida ett kriterium är uppfyllt. (Ur TNC 98, Tekniska basord).

(1) Det att övervaka och behärska ett skeende eller en apparat eller dylikt, för att vid behov gripa in och reglera eller dylikt. (2) (Mindre) undersökning för att fastställa om allt är i sin ordning på naturligt sätt eller enligt föreskrivna regler (Ur Nationalencyklopedins ordbok, 1999).

- Krav: Oeftergivligt önskemål (Ur Nationalencyklopedins ordbok, 1999).
- Projektering: Planering och utformning av anläggning e.d.; även resultat härav (Ur TNC 73: Bergteknisk ordlista).
- Uppföljning: Det att fortsätta eller vidareutveckla i den naturliga riktningen eller till ett följdriktigt slut. (Ur Nationalencyklopedins ordbok, 1999).
- Utformning: Ge slutgiltig form åt (Ur Nationalencyklopedins ordbok, 1999).
- Verifiering: Operation/ åtgärd som innebär bekräftelse av att ett objekt har uppfyllt ställda krav. Verifieringen kan göras genom beräkning eller provning. (Ur TNC 95, Plan- och byggtermer 1994 och TNC 98, Tekniska basord).
Bestyrka riktigheten av påstående, uppgift, dokument eller dylikt. (Ur Nationalencyklopedins ordbok, 1999).

2 Krav på en tunnel

2.1 Vägnätet

En tunnel ska dimensioneras så att den bidrar till att det vägavsnitt som den ligger på säkerställer en samhällsekonomiskt effektiv och långsiktig hållbar transportförsörjning.

I Vägverkets vision om vägtransportsystemet anges att: ”Alla kan välja säkra resor och transporter i ett uthålligt och effektivt vägtransportsystem som tillgodoser växande behov av rörlighet”.

Fem delmål för vägarna kan urskiljas;

- tillgänglighet
- hög transportkvalitet
- säkerhet
- god miljö
- positiv regional utveckling.

Dessa krav gäller således även för byggnadsverket tunnel men det finns inget absolut krav på att tunneln ska uppfylla varje delmål. Vägen som helhet ska dock ge den bästa samlade måluppfyllelsen.

2.2 Övergripande krav på en tunnel

Samhällets krav är formulerade i lagen om tekniska egenskapskrav på byggnadsverk, SFS 1994:847. Denna lag, byggnadsverklagen, är en implementering av EU's byggproduktdirektiv.

Till dessa kommer sedan de krav som utgår från ägaransvaret, dvs. att tunneln förvaltas så att mesta nyttan erhålls på det långsiktigt billigaste sättet och att de ovannämnda fem delmålen för vägarna uppfylls.

De första två paragraferna i byggnadsverklagen har lydelsen:

”Lagens tillämpningsområde

1 § Denna lag gäller tekniska egenskapskrav på byggnadsverk (byggnader och andra anläggningar) och byggprodukter.

Med byggprodukt avses i lagen en produkt som är avsedd att stadigvarande ingå i ett byggnadsverk. Lag (1999:366).

Tekniska egenskapskrav på byggnadsverk

2 § Byggnadsverk som uppförs eller ändras skall, under förutsättning av normalt underhåll, under en ekonomiskt rimlig livslängd uppfylla väsentliga tekniska egenskapskrav i fråga om

1. bärförmåga, stadga och beständighet,
2. säkerhet i händelse av brand,
3. skydd med hänsyn till hygien, hälsa och miljö,
4. säkerhet vid användning,
5. skydd mot buller,
6. energihushållning och värmeisolering,
7. lämplighet för avsett ändamål,
8. tillgänglighet och användbarhet för personer med nedsatt rörelse- eller orienteringsförmåga, och
9. hushållning med vatten och avfall.

De tekniska egenskapskraven skall iakttas med beaktande av de varsamhetskrav som finns i 3 kap. 10-14 §§ plan- och bygglagen (1987:10).

Byggnadsverk skall underhållas så att deras egenskaper i de hänseenden som avses i första stycket i huvudsak bevaras. Anordningar som är avsedda att tillgodose kraven i första stycket 2-4, 6 och 8 skall hållas i stånd. Lag (1999:366).”

2.3 Bärförmåga

Det ovannämnda generella kravet på bärförmåga, stadga och beständighet innebär enligt förordningen om tekniska egenskapskrav hos byggnadsverk att, SFS 1994:1215:

”Byggnadsverk skall vara projekterade och utförda på ett sådant sätt att den påverkan de sannolikt utsätts för under bygg- och bruksskedet inte leder till

- *ras av byggnadsverket, helt eller delvis,*
- *oacceptabla större deformationer,*
- *skada på andra delar av byggnadsverket, dess installationer eller fasta utrustning till följd av större deformationer i den bärande konstruktionen, eller*
- *skada som inte står i proportion till den händelse som orsakat skadan.”*

För byggnader finns det ytterligare och mer detaljerade föreskrifter och råd om hur man ska eller kan uppfylla de väsentliga kraven.

För tunnlar finns inga mer detaljerade regler. Vägverket har därför tagit fram en allmän teknisk beskrivning, Tunnel 99, som anger en nationell kravnivå som uppfyller förordningens krav.

2.4 Brandsäkerhet

Det generella kravet på säkerhet vid brand innebär enligt förordningen om tekniska egenskapskrav hos byggandsverk att, SFS 1994:1215:

”Byggnadsverk skall vara projekterade och utförda på ett sådant sätt att

- *byggnadsverkets bärförmåga vid brand kan antas bestå under en bestämd tid,*
- *utveckling och spridning av brand och rök inom byggnadsverket begränsas,*
- *spridning av brand till närliggande byggnadsverk begränsas,*
- *personer som befinner sig i byggnadsverket vid brand kan lämna det eller räddas på annat sätt, och*
- *räddningsmanskapets säkerhet vid brand beaktats”*

Dimensionering av bärförmåga vid brand kan ske på analogt sätt som beskrivs för bärförmåga för andra laster. Det är emellertid vanligare att utformning sker med typlösningar som i sin tur har verifierats genom provning enligt en standardbrandkurva. Verifiering av personsäkerheten, det vill säga de två sistnämnda kraven, sker dock efter andra modeller som inte är lika välutvecklade, se vidare under avsnitt 4.2.

2.5 Övriga väsentliga krav

De övriga väsentliga tekniska egenskapskraven som ett byggnadsverk enligt 2§ i 1994:847 ska uppfylla redovisas kortfattat under respektive rubrik. Angiven kravtext är hämtad från förordningen om tekniska egenskapskrav hos byggnadsverk, SFS 1994:1215.

2.5.1 Hälsa och miljö

”Byggnadsverk skall vara projekterade och utförda på ett sådant sätt att de inte medför risk för brukarnas eller grannarnas hygien eller hälsa, särskilt inte som följd av

1. *utsläpp av giftig gas,*
2. *förekomst av farliga partiklar eller gaser i luften,*
3. *farlig strålning,*
4. *förorening eller förgiftning av vatten eller mark,*
5. *bristfälligt omhändertagande av avloppsvatten, rök och fast eller flytande avfall, eller*
6. *förekomst av fukt i delar av byggnadsverket eller på ytor inom byggnadsverket.”*

Se avsnitt 4.3 samt förstudien ”Miljöanpassade tunnlar”, 1999-12-30.

2.5.2 Säkerhet vid användning

”Byggnadsverk skall vara projekterade och utförda på ett sådant sätt att de inte innebär oacceptabel risk för olyckor vid användning eller drift, såsom halkning, fall, sammanstötning, brännskador, elektriska stötar eller skador av explosioner.”

Se avsnitt 4.4 samt förstudien ”Personsäkerhet i tunnlar”, 1999-03-23.

2.5.3 Skydd mot buller

”Byggnadsverk skall vara projekterade och utförda på ett sådant sätt att buller, som uppfattas av brukarna eller andra personer i närheten av byggnadsverket, ligger på en nivå som inte medför risk för dessa personers hälsa och som möjliggör sömn, vila och arbete under tillfredsställande förhållanden.”

Vibrationer betraktas på samma sätt som buller. Se avsnitt 4.5.

2.5.4 Energihushållning och värmeisolering

”Byggnadsverk och deras installationer för uppvärmning, kylning och ventilation skall vara projekterade och utförda på ett sådant sätt att den mängd energi som med hänsyn till klimatförhållandena på platsen behövs för användandet är liten och värmekomforten för brukarna tillfredsställande.”

Se vidare i avsnitt 4.6.

2.5.5 Lämplighet för avsett ändamål

Förordningen innehåller enbart krav för byggnader som är bostäder. Dessa krav är inte tillämpliga på vägtunnlar.

Vägtunnlar ska vara ändamålsenligt utformade för effektiv och säker trafikavveckling. Utformningskraven specificeras i planeringsfasen

2.5.6 Tillgänglighet och användbarhet för personer med nedsatt rörelse- eller orienteringsförmåga

Byggnader, som innehåller bostäder, arbetslokaler eller lokaler till vilka allmänheten har tillträde, skall vara projekterade och utförda på ett sådant sätt att bostäderna och lokalerna är tillgängliga för och kan användas av personer med nedsatt rörelse- eller orienteringsförmåga.

Förordningens krav på lokaler till vilka allmänheten har tillträde kan ses som vägledande för utformningen av vägtunnlar. Funktionshindrade har samma behov som andra av att kunna använda den fysiska miljön och

samma rätt att använda den. Vägverkets policy i handikappfrågor (2000) lägger grunden för hur vi inom vårt ansvarsområde arbetar för att funktionshindrade alltid skall ha samma möjligheter som andra att resa och för att de skall ha tillgång till information och service.

Se avsnitt 4.7 samt förstudien ”Personsäkerhet i tunnlar”, 1999-03-23.

2.5.7 Hushållning med vatten och avfall

Byggnader skall vara projekterade och utförda på sådant sätt att de medger god hushållning med vatten.

En vägtunnel bör utformas så att dränering av omgivande mark begränsas.

3 Dimensioneringsprocessen

3.1 Uppdelning

Ett strukturerat och konsekvent arbetssätt är viktigt för att dimensioneringen skall ge ett bra resultat. Det är också en förutsättning för att de väsentliga egenskapskraven skall kunna optimeras trots att arbetsrutinerna skiljer sig markant inom de olika teknikområdena.

I denna förstudie uppdelas analysen av de olika områdena under rubrikerna Krav, Förutsättningar, Verifiering, Kontroll och Uppföljning.

Denna indelning är samma som den som Boverket tillämpar i reglerna för byggnader.

Arbetsmetod och noggrannhetsnivå för dimensioneringen påverkas av i vilken tidsfas projektet befinner sig och hur detaljerat kravet är formulerat.

Risikanalys genomförs för att kunna identifiera processer som är felbenägna och att kunna styra dem till rätt resultat. Säkerhetsfrågor är speciellt viktiga att studera, se Tunnel 99, 2.3.2.

- Den tidiga projekteringen skall säkerställa att projektet är genomförbart samt tekniskt och ekonomiskt optimerat. De tekniska kraven innefattar även utformningen och säkerheten samt att miljöpåverkan är acceptabel och minimerad.
- Den generella utformningen skall genomföras så att funktionskraven blir uppfyllda. För utpekade kritiska funktioner eller delar kan det i detta skede behövas en mer detaljerad dimensionering. Detta arbetssätt förutsätter, för de effekter som inte detaljstuderas, att projektören har kunskap om att *vid det föreslagna utförandet uppfylls ställda krav enligt erfarenhet*.
- I projektets genomförandefas skall dimensioneringen vara så detaljerad att det verifieras att ställda krav är uppfyllda.

3.2 Krav

De krav som anges för att uppnå en önskad egenskap är startlänken i dimensioneringskedjan. Kraven utgår från de i kapitel 2 beskrivna övergripande egenskaperna som byggnadsverket tunnel skall uppfylla.

Kraven måste vara tydligt kvantifierade och kopplade till de övriga stegen i dimensioneringskedjan.

Ett allmänt formulerat funktionskrav måste kunna detaljeras och följas upp successivt under projektets genomförandeprocess.

3.3 Förutsättningar

Inför dimensioneringen för ett visst krav måste det alltid vara klarlagt vilka randvillkor och andra förutsättningar som skall gälla.

Avgränsning mellan förutsättningar och krav kan vara flytande. Ett exempel är säkerheten i en viss funktion: ett givet krav skall med en given statistisk säkerhet gälla för en viss tidsperiod. Såväl den statistiska säkerheten som tidsperioden ska vara formulerad antingen i kravet eller i förutsättningarna.

3.4 Verifiering

Resultatet av dimensioneringen skall visa att det aktuella kravet är uppfyllt och att angivna förutsättningar har tillämpats.

Känslighetsanalyser skall göras i verifieringsarbetet.

I enkla fall är hela dimensioneringsprocessen känd och styrd t.ex. vid hållfasthetsberäkning av ett okomplicerat byggnadsverk. Ingen speciell riskanalys behöver då genomföras eftersom den är inbyggd i dimensioneringsprocessen.

Tunnlar är ofta komplexa byggnadsverk och ett fel i någon av funktionerna i det delvis slutna tunnelutrymmet kan leda till betydande konsekvenser för trafikanternas säkerhet. I dessa fall skall risk- och känslighetsanalyser dokumenteras i verifieringen.

3.5 Kontroll

Kritiska, osäkra och svåra delar i dimensioneringen kan behöva kontrolleras. Ett exempel på detta är den generella dimensioneringskontrollen av hållfasthetsberäkningar.

Om byggnadsverket dessutom är klassat i den högsta säkerhetsklassen (säkerhetsklass 3) skall denna kontroll kompletteras med kontroll utförd av en *"från det aktuella projektet fristående expert"* (BKR, 4.6) .

Det bör strävas efter att erforderliga kontroller skall ske som egenkontroll. På detta sätt läggs ansvaret på rätt part och incitament skapas för att aktiviteterna utförs rätt från början, vilket alltid leder till lägsta totalkostnader. Förutsättningen om egenkontroll bör kompletteras med en bedömning av om de medverkande parterna har erfarenhet av ett sådant arbetssätt. Om detta inte är fallet bör kontrollen förstärkas.

3.6 Uppföljning

Om någon förutsättning för dimensioneringen inte är möjlig att få kunskap om eller att en förutsättning kan förändras på ett svårförutsägbart sätt måste kravuppfyllandet säkras genom uppföljning under anläggningens byggande och brukande.

I vissa fall kan pålitliga dimensioneringsmodeller saknas och då är uppföljning nödvändig.

Generellt skall en strävan vara att utveckla dimensioneringsprocessen så att behovet av uppföljning och kontroll minskar. I de flesta fall leder detta till lägsta totalkostnad eftersom alla åtgärder i driftskedet kostar mycket.

4 Dimensionering av

4.1 Bärförmåga

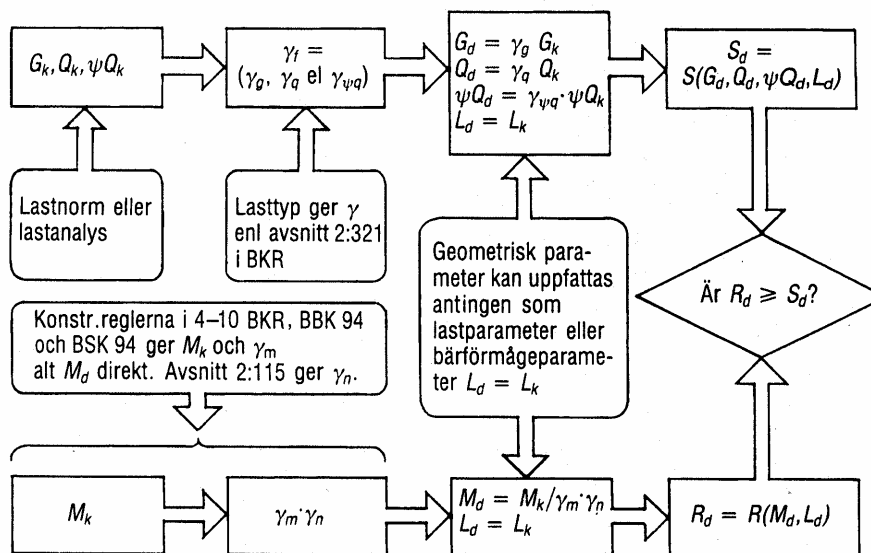
4.1.1 Principer

En vägtunnels konstruktionsdelar är indelad i tre olika typer enligt definitioner i Tunnel 99, 1.3.2; bärande huvudsystem, inredning och installationer. Alla dessa är byggdelar som ska uppfylla de väsentliga tekniska egenskapskraven i fråga om bärförmåga, stadga och beständighet. Med bärande huvudsystem avses:

”Anläggningsdelar inklusive berg och jord som nyttjas för att säkerställa tunnels bärförmåga, stadga och beständighet. Till bärande huvudsystem räknas även fribärande trafikbelastade anläggningsdelar.”

Verifiering av bärförmåga sker för de flesta byggnadsverk med en dimensionering som utförs med en sannolikhetsbaserad modell där det visas att byggnadsverkets bärförmåga är större än den samlade lasteffekten.

Dimensioneringen sker enligt Boverkets regler och kan illustreras enligt följande principschema (S-O Björk, *Bärande konstruktioner och laster; En handbok i anslutning till Boverkets konstruktionsregler*, 1996.)



Figur 3:1. Principschema för tillvägagångssättet vid dimensionering enligt partialkoefficientmetoden.

Det kan noteras att, vid dimensionering i brottgränstillstånd enligt ovan, används laster som har sannolikheten $\sim 10^{-2}$ per år och att dimensionering sker, om konstruktionen bedöms vara i högsta säkerhetsklassen, så att den årliga brottsannolikheten är 10^{-6} . Vid dimensionering, enligt ovan,

för olyckslast används laster som har sannolikheten $\sim 10^{-4}$ per år och dimensionering sker så att den årliga brotts sannolikheten är 10^{-2} .

Vägtunnlar och övriga bergutrymmen definieras som *Byggnadsverk* och Anläggning och omfattas egentligen inte av Boverkets föreskrifter BBR och BKR, som gäller för *Byggnader*. Vägverkets krav på vägtunnlar återfinns i den allmänna tekniska beskrivningen Tunnel 99.

Metodiken med sannolikhetsbaserad dimensionering, exempelvis med partialkoefficientmetoden, används inte fullt ut vid dimensionering av bergkonstruktioner bl.a. på grund av stora osäkerheter avseende bergmassans lasteffekt.

För dimensionering av bergkonstruktioner finns dock, i branschen, en vedertagen praxis för hur en relevant dimensionering skall utföras. I Tunnel 99 anges inledningsvis den allmänna kopplingen till BKR, i avsnitt 3.2.1 Bärförmåga och stadga, enligt;

”Bärförmågan skall verifieras enligt Boverkets konstruktionsregler, BKR med undantag av punkt 2:321 samt kapitel 3. Lastförutsättningar enligt avsnitt 3.3 skall tillämpas.

Vägledande vid dimensionering som genomförs på annat sätt än med beräkning är att konstruktionsdelens årliga brotts sannolikhet bör visas vara mindre än

- 10^{-4} för säkerhetsklass 1*
- 10^{-5} för säkerhetsklass 2*
- 10^{-6} för säkerhetsklass 3.*

Dimensioneringsprinciper, beräkningsmodeller och antagna förutsättningar skall redovisas och motiveras.

Dimensioneringen skall utgå från att såväl statiska system som laster varierar under byggskede, driftskede samt vid olyckslastfall.”

I Tunnel 99, 3.2.1.1, anges vidare att

”Vid dimensionering skall hänsyn tas till förväntade deformationer, så att erforderlig grad av samverkan med omgivande jord och berg säkerställs.

Bärande huvudsystem för trafikutrymme skall utföras i säkerhetsklass 3 respektive geoteknisk klass GK2 eller GK3 enligt BKR, avsnitt 2:11 respektive 4:21.

Vägledande för val av GK3 kan vara när bergtäckningen är mindre än halva tunnelns spännvidd eller vid sektioner med dålig bergkvalitet, exempelvis $Q < 1$ vid zonbredd större än 2 meter eller när omgivningsförhållandena är sådana att de väsentligt förstör konsekvenserna av brott eller deformationer i det bärande huvudsystemet.

Bärande huvudsystem för sidoutrymme skall utföras i säkerhetsklass enligt BKR.”

Efter denna inledande koppling i Tunnel 99 av kraven gentemot BKR, anges i Tunnel 99, avsnitt 3.4.3 Verifiering, underkapitel Bärförmåga, Allmänt, att vedertagen praxis för dimensionering av berganläggningar kan godtas för verifiering av bärförmåga avseende vägtunnel i berg. Detta uttrycks i Tunnel 99 med följande text:

”Bergmassa skall, tillsammans med bergförstärkning, betraktas som bärande huvudsystem och dimensioneras som en sammanhållen enhet.

Bergyta skall alltid säkras mot blocknedfall. Vid bergytor i tak skall hela ytan vara säkrad.

Denna säkring utförs vanligen med sprutbetong och/eller bergbult.

Heltäckande säkring i tak kan avslutas där anslutande vägg är vertikal.

Bärförmåga för bergtunnel skall verifieras.

Verifieringen bör utgöras av följande aktivitetskedja:

- *förutsättningar och undersökningar klarläggs respektive utförs samt redovisas i förundersökning*
- *sammanfattande analys av resultat från förundersökning och bedömning av bergkvalitet, drivnings-, förstärknings- och tätningmetoder redovisas i prognos*
- *valda förstärkningslösningar dimensioneras med bergmekaniska beräkningar/bergmekaniska utredningar*
- *prognos för bergkvalitet, utförandeanvisning för förstärknings- och tätningarbeten samt övriga anvisningar redovisas på bergritning*
- *bergritnings överensstämmelse med antagna förutsättningar och utfört arbete dokumenteras på bergkarteringsritning.*

Bärförmåga för tunnel godtas säkerställd med konventionella bergförstärkningsmetoder. Bergförstärkning skall dimensioneras med hänsyn till bl.a. materialegenskaper, hållfasthet, bergspänningar, spricksystem, blockighet, sprickfyllnader, vittring och vidhäftningsegenskaper.

Vid verifiering av förstärkningens bärförmåga skall även faktorer som anläggningens geometri, påverkan från närliggande anläggningar och lokala stabilitetsproblem beaktas.

Dimensionering av bergförstärkning får bestämmas utifrån empirisk metod som bygger på stort materialurval, t ex Q-metoden (Engineering classification of rock masses for the design of rock support (NGI) och Updating of the Q-system for NMT (Norwegian Concrete Association)). Om empirisk dimensioneringsmetod väljs skall kompletterande bergmekaniska beräkningar/bergmekaniska utredningar utföras i erforderlig omfattning.

Dimensionering skall ske med hänsyn till krav på livslängd och behov av underhåll.

Dimensionering av konstruktion där bärförmågan helt säkras genom en platsgjuten betongkonstruktion eller en stålkonstruktion skall utföras enligt avsnitt 3.5.”

Vidare anges i Tunnel 99, 3.4.3 Verifiering, underkapitlen Brottgränstillstånd och bruksgränstillstånd, att ”Bergmekaniska hållfasthetsberäkningar/ bergmekanisk utredning skall utföras såvida det inte påvisas att behov inte föreligger.

Vägledning beträffande dimensionering av bergförstärkning kan fås i Bergbultning, Dimensionering, praxis och tillämpningar (BeFo), i Bergförstärkning med sprutbetong (Vattenfall) och i Bergteknik, dimensioneringsgrunder för användning vid bergförstärkning med sprutbetong (Vägverket).

Vid dimensionering för olyckslast får de lokala skadorna inte bli så omfattande att utrymning eller räddningstjänst förhindras.

Krav på största tillåtna deformation eller deformationsskillnad samt sannolikhet för överskridande skall vara angivna i den tekniska beskrivningen.

Anläggningsdelar skall ha sådan styvhet att deformationer eller förskjutningar inte stör dess funktion eller skadar andra anläggningsdelar.”

Avslutningsvis kan nämnas att de idag fastställda Eurocode-dokumenterna till viss del behandlar dimensionering av bergkonstruktioner, men att erfarenheter att tillämpa dessa för tunnlar och berganläggningar är bristfälliga i Sverige.

4.1.2 Beständighet

Beständighetsaspekterna hanteras, till övervägande del, under ramprojektet Optimala standarder, littera SVT:12, i Vägverkets FoU-plan 2000-2002. Ett antal beständighetsaspekter, exempelvis bruksgränsdimensionering kommer dock på ett övergripande sätt att behandlas i föreliggande förstudie.

Frågeställningar associerade med täthet (inläckage och funktionskraven avseende fukt/droppande vatten) och frostsäkring av vägtunnlar behandlas i förstudien "Tätning och frostsäkring av tunnlar". I föreliggande förstudie kommer dock ett antal frågor med koppling mot täthet och frostsäkring att behandlas, exempelvis frågor avseende vattentäta betongkonstruktioner, bruksgränsdimensionering, läckage i dilfogar etc..

Följande projekt genomförs eller har genomförts inom ovan nämnda ramprojekt:

- Tunnelmiljöns korrosiva egenskaper (avslutat projekt 2001)
- Sprutbetongs beständighet (del 1 avslutat 2001, del 2 är planerat starta 2002)
- Beständighet hos ingjutna bergbultar; analys av bergbultar från Vindötunneln (pågående projekt, planeras att avslutas under 2002)
- Uppbyggnad av prototyp till linjärt LCC-program (pågående FoU-insatser på brosidan är inriktat mot att utveckla ett system för analyser av livscykelkostnader, och det bygger på Vägverkets databaser).

4.1.3 Bergtunnel

4.1.3.1 Problem

Dimensioneringsmodeller för bärande konstruktioner av bergtunnlar är behäftade med osäkerheter. Bergkonstruktioner kan idag inte dimensioneras med sannolikhetsbaserade metoder, vilket tillämpas för byggnadsverk som utförs i betong eller stål och även för geokonstruktioner. Denna brist medför att Vägverket inte kan "tillförsäkra" samma säkerhetsnivå för byggnadsverket bergtunnel som för andra byggnadsverk. Det är också sannolikt att vi idag överförstärker, dvs. att vi med mer exakta metoder kan utföra bergkonstruktionerna billigare.

Konstruktioner i berg kännetecknas av flera faktorer som gör denna typ av konstruktion mer komplicerad än de andra. Problemet kan ges följande uppdelning.

- Belastningen på en konstruktion i berg är ett resultat av samverkan mellan berget och utförd förstärkning. Lasteffekt och

motståndsförmåga enligt BKR 99's terminologi blir därmed inte entydiga och oberoende av varandra.

- Bergmassans mekaniska egenskaper styrs av bergets sprickstruktur och gör att berget i princip inte kan beskrivas som ett isotropt material.
- Bergmassans egenskaper och kvalitet bestäms genom fåtalsprovning.
- Bergmassans mekaniska egenskaper är skalberoende.
- Dimensionering av konstruktioner i berg kännetecknas ofta av en interaktiv process med en med utförandet successivt ökande informationsmängd och användning av olika typer av observationssystem med larmgränser.

Dessa faktorer och problemställningar är relevanta för alla typer av konstruktioner i berg. Problemet svårighetsgrad kan dock givetvis variera.

De beräkningsmodeller för stålfiberarmerad sprutbetong som finns idag är mycket ofullständiga. Eftersom stålfiberarmerad sprutbetong används som förstärkningskonstruktion i merparten av de bergtunnlar som byggs i landet så är det mycket angeläget att dessa beräkningsmodeller tas fram.

Stålfibrer används i mycket stor utsträckning som armering vid sprutbetongförstärkning av berg. Fördelar jämfört med konventionell nätarmering är flera, både produktionstekniska och funktionella. Fortfarande är det dock inte helt klart hur krav på sprutbetongen ska formuleras eller hur dimensioneringen ska göras för att svara mot förväntad funktion hos förstärkningen. Förslag till materialspecifikationer har presenterats i en rapport av Alemo, Holmgren och Skarendahl "Stålfiberbetong för bergförstärkning - provning och värdering". Dimensioneringsproblemet sammanhänger med att belastningssituationen ofta inte är uppenbar, som diskuterats ovan. Det krävs som regel särskilda bergmekaniska överväganden för att beskriva förväntade deformationer och belastningar och eventuell samverkan med andra konstruktionselement, t ex ingjutna bergbultar.

En ytterligare osäkerhet är att det inte finns något fungerande modell med vilket bärförmågan hos en fiberarmerad förstärkning kan bestämmas. Det är därför mycket viktigt att försöka öka förståelsen för hur en fiberarmerad förstärkning verkar när den blir belastad och vad som karakteriserar vilken last den kan bära. Att utföra en ekonomisk, säker och ur ingenjörshänseende riktig dimensionering av ett fiberarmerat tvärsnitt för bergsammanhang är därför i dag inte en enkel operation.

Bergtunnlars krav på täthet medför normalt att systematisk förinjektering utförs med cementbruk. Stora insatser har gjorts för att förstå hur

injekteringsbruk penetrerar och tätar sprickor i hårt kristallint berg. Kunskapen om vilken förstärkande verkan som detta har är däremot en frågeställning som inte är helt klarlagd. Här finns alltså en möjlighet att med bibehållen säkerhet kunna minska omfattningen av de kompletterande förstärkningsarbetena.

Bruksgränsdimensionering med avseende på beständighetskrav för armerade betongkonstruktioner uppfylls till stor del genom att begränsa sprickvidden i långtidslastfallen. Modeller saknas emellertid för att genomföra sprickbreddsberäkningar för betongkonstruktioner som samverkar med omgivande berg eller jord. Det är även i detta fall sannolikt att bättre kunskap skulle kunna leda till att billigare konstruktionslösningar kan användas.

För explosionslaster i bergtunnlar är kunskaperna bristfälliga när det gäller dimensionerande last och dimensioneringsmetoder. Kraven på effektivitet och säkerhet i transportsystemet och i samhället totalt sett leder till att nya tunnlar bör upplåtas för transporter med farligt gods. Kunskap om laststorlekar och dimensioneringsmodeller är bristfällig. Detta kan idag leda till feldimensionering.

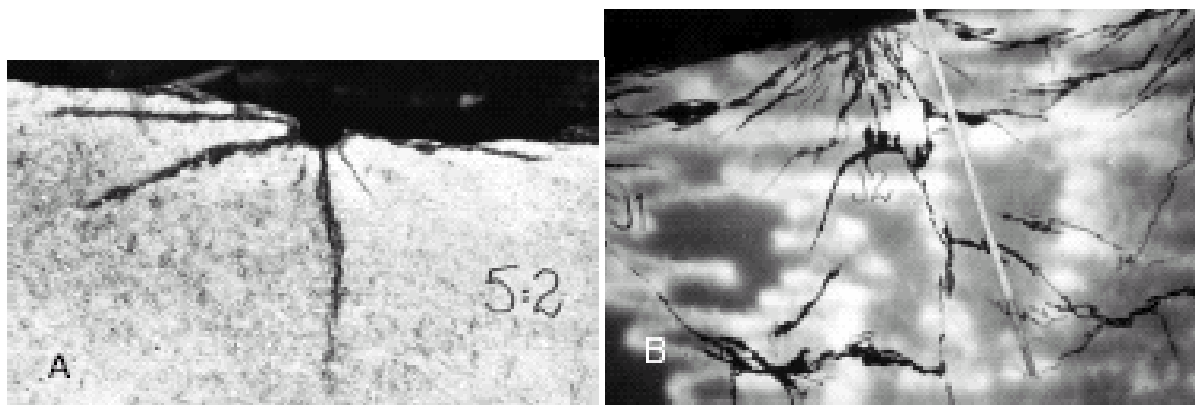
Vägverket utkom 1999 med en ny version av Allmän teknisk beskrivning för vägtunnlar – Tunnel 99. En av nyheterna i denna utgåva, jämfört med föregångaren Tunnel 95, är kraven på dimensionering med hänsyn till dynamiska laster med avseende på explosioner.

P.g.a. att Tunnel 99 är relativt ny har tillämpningen av kraven ännu inte hunnit utvärderas, eftersom endast ett fåtal tunnlar har projekterats efter det att Tunnel 99 kom ut i november 1999 (Götatunneln, Tunnel vid Grind och ombyggnaden av Vindötunneln). Därför har det heller inte utvecklats någon dimensionerings- eller beräkningspraxis avseende explosionslaster i bergtunnlar. Inte heller internationellt sett har det utvecklats någon praxis avseende beräkningsmetoder för dynamiska laster/explosionslaster för bergtunnlar.

Då det bärande huvudsystemet utgörs av betong, d.v.s. då en betongtunnel skall dimensioneras hänvisas projektören till VST:s publikation "Explosionslaster vid betongtunnlar", ANV 0187 för att få råd avseende beräkningsmetod. Denna anvisning bygger på en förenklad modell för beräkning av moment och deformationer med hjälp av energibetraktelser. När det gäller bergtunnlar ger Tunnel 99 inga råd avseende beräkningsmetod. Bergtunnlar utgör ofta ett komplext system med avseende på geometri, bergets egenskaper och olika förstärkningselements funktion och materialegenskaper, vilka man bör ta hänsyn till vid dimensioneringen. Därför kan inte verifiering av bärförmågan i en bergtunnel utföras med hjälp av förenklade analytiska modeller. Datorbaserad numerisk analys bör därför kunna utgöra ett attraktivt verktyg vid sådana analyser eftersom hänsyn kan tas till många

faktorer samtidigt, i en och samma beräkning. En utveckling av metodik och verktyg så att dynamisk numerisk analys kan utföras med avseende på explosionslaster i bergtunnlar enligt Tunnel 99, är således önskvärd.

Vid drivning av tunnlar och berggrum med konventionell borrhning och sprängning är det ofrånkomligt att det kvarvarande berget skadas närmast tunnelkonturen. Med användande av skonsam sprängning kan dessa skador begränsas. Huvudsakligen medför utförande av tunneln med skonsam sprängning att det ytnära berget i anslutning till tunnelns väggar, tak och sula lämnas så ostört som möjligt. Ett ostört berg i tunnelns periferi medför i sin tur att utförd förinjektering lämnas mera oskadade av sprängningsarbetena samt att mindre kilar och block sitter bättre förankrade än vad som ofta blir fallet vid konventionell sprängning. En tunnel som sprängts med skonsam sprängning är mer homogent med mindre andel sprängningsinducerande sprickor än ett berg där kraftigare sprängning applicerats. I figur 4.1 åskådliggörs skillnaden i sprickutbredning i kvarstående berg, orsakade av olika grad av skonsam sprängning.



Figur 4.1 Bilder från sprängförsök i Vånga. Bild A visar en mer skonsam sprängning med en frikopplad laddning medan bild B visar effekterna från en motsvarande sprängning med fulladdade hål. (Ouchterlony och Olsson, 2000)

Konsekvensen av skada på det kvarvarande berget har en fundamental betydelse för förstärkningsbehovet av den aktuella konstruktionen, eftersom detta berg normalt samverkar med applicerad förstärkning. De faktorer som har störst betydelse för skadezonens utbredning vid sprängning och hur skadezonen skall beaktas vid dimensionering av en samverkande konstruktion av berg och applicerad förstärkning är i nuläget inte klarlagt.

4.1.3.2 Utförd och pågående FoU

Under år 2000 avslutades projektet ”Sannolikhetsbaserad dimensionering vid bergbyggande” med licentiatavhandlingen ”Dimensionering av

berganläggningar – en inledande studie”. Projektet drevs i SveBeFos regi med Magnus Nelson, KTH avdelningen för jord- och bergmekanik, som forskarresurs. Projektet drevs med en sammansatt finansiering där Vägverket och Banverket medverkade.

I projektet togs fasta på att dimensionering grundar sig på att finna ett tillfredsställande förhållande mellan bärförmåga och lasteffekt. En viktig fråga är då hur bärförmåga och lasteffekt skall jämföras och vilket krav som ställs på förhållandet. Ursprunget till den genomförda studien ligger i frågan om man kan använda sannolikhetsbaserade metoder vid denna jämförelse. Lämpligheten har, i projektet, behandlats genom att brottmekanismen ”instabila block” samt ”valvstabilitet” har studerats.

Slutsatserna från projektet visar på utmaningarna/ svårigheterna med en direkt beräkning av brottsannolikhet, för de studerade brottmekanismerna, som dimensioneringsverktyg. Svårigheten ligger i att kunna beskriva parametrarna med trovärdiga fördelningsfunktioner.

Trots svårigheterna som följer med den sannolikhetsbaserade dimensioneringen visar sig flera intressanta fördelar och möjligheter att gå vidare. För brottmekanismen instabila block kvarstår frågan om hur man kan skapa ett brottgränsuttryck som behandlar existensen/ förekomsten hos block (eg. var och när existerar ett instabilt block så att förstärkningsinsatser måste genomföras). Valvproblematiken förefaller vara mer hanterbar och dimensionering med β -metoden möjlig. För båda brottmekanismerna bedöms det dock vara möjligt att, med ökad kunskap, använda partialkoefficienter som dimensioneringskriterium. Den kanske svåraste frågan att lösa då är att fastställa ett acceptanskrav. Ett sådant krav saknas även idag vid dimensionering med totalsäkerhetsfaktor. Fortsatt arbete bör därför behandla vilket krav på säkerhet som ställs vid dimensionering avseende både instabila block och valvstabilitet.

En annan viktig fråga är kopplad till de dimensioneringsverktyg som föreskrivs ibland annat BKR 99. Det kan konstateras att den bergmekaniska dimensioneringen har stor nytta av erfarenhetsåterkoppling och observationer under arbetets utförande. Hur dessa kompletterande verktyg skall användas och vilken påverkan de har på säkerheten för en berganläggning är inte utredd.

I det pågående projektet ”Dimensionering av stålfiberarmerade konstruktioner i sprutbetong vid bergförstärkning” bedrivs arbete med fokus på att skapa ytterligare underlag för dimensionering och därmed också utförande och kravspecifikation avseende stålfiberarmerad sprutbetong för bergförstärkning. Detta FoU-projekt drivs av SveBeFo med Ulf Nilsson, KTH avdelningen för byggkonstruktion, som forskarresurs.

Efter genomförd först etapp (avslutad år 2000), inkluderande licentiatavhandlingen ”Load bearing capacity of steel fibre reinforced shotcrete linings” och ”Bärförmåga hos fiberarmerad sprutbetong.

Laboratorieförsök på cirkulära plattor” SveBeFo-rapport 52, har en andra etapp planerats och påbörjats. Liksom för den första etappen drivs projektet med en sammansatt finansiering där Banverket, Vägverket, SveBeFo och SBUF medverkar.

Projektets andra etapp ska på teoretisk grund klargöra hur en fiberarmerad sprutbetongförstärkning verkar och genom realistiska försök belysa mekanismerna och därmed bidra till en effektivare förstärkning utan att minska säkerheten.

I den första etappen av projektet som har avrapporterats under 2000 har ett stort antal provkroppar provats dels armerade med fibrer, dels oarmerade. De oarmerade provkropparna användes för att kunna uppskatta graden av valvverkan. Många av provkropparna har även tillverkats med brottanvisningar. Detta gjordes för att underlätta jämförelsen av testresultaten med den beräknade bärförmågan. Genom att prova olika sätt att belasta framförallt statistiskt obestämda platt/balkkonstruktioner är målet att kunna förstå kraftfördelningen i konstruktionselementen och utifrån detta lägga fram en grund till ett beräkningsförfarande med vilket man kan bedöma bärförmågan hos en fiberarmerad förstärkning.

I projektets första etapp har den bultade sprutbetongförstärkningen liknats med ett pelarunderstött bjälklag. Erfarenheter från detta område anvisar att det i huvudsak är två stycken brottyper som bör studeras för att erhålla dimensionen på bjälklaget och det är en cirkulär plattdel kring en pelare och en balkstrimla mellan pelarna. En stor mängd försök har av den anledningen utförts på cirkulära plattor och balkar för att öka förståelsen av hur dessa strukturer beter sig i brottsstadiet när fiberbetong används. Försöken har sedan jämförts med en beräknad bärförmåga vilken har baserats på brottlinjeteori som har visat sig vara en användbar metod när traditionellt armerad betong använts.

Jämförelsen mellan provningsresultaten och de beräknade värdena, i projektets första etapp, visade dock att konventionell brottlinjeteori baserad på rotationskapaciteten i brottlinjerna inte tillfredställande kunde uppskatta bärförmågan hos provkropparna. Den beräknade bärförmågan var genomgående mycket lägre än vad provningsresultaten uppvisade. Detta kan troligen förklaras med att provkropparna upptar lasten huvudsakligen genom valvverkan. Det var emellertid relativt överraskande att valveffekten var så stor i försöken, eftersom provkropparna var ganska tunna i förhållande till sin spännvidd.

Under år 2001 avslutades projektet ”Bergmekaniska aspekter på förinjektering” med doktorsavhandlingen ”Rock mechanical effects of cement grouting in hard rock”. Projektet drevs i SveBeFos regi med Staffan Swedenborg, CTH Geoteknik, som forskarresurs. Projektet drevs med en sammansatt finansiering där Vägverket och Banverket medverkade.

I projektet studerades det principiella brottbeteendet hos cementinjekterade bergssprickor i relation till oinjekterade bergsprickor. Av de direkta skjuvförsöken med injekterade och oinjekterade sprickor kunde slutsatsen dras att injekteringsbruket kan fungera som ett smörjande media i ett sprickplan utsatt för skjuvrörelser. Det "hydrauliska genombrottet" (dvs. att vattenläckage återuppstår i den injekterade sprickan efter utförd tätningsinsats) är vidare en funktion av sprickplanets dilatans och uppträder samtidigt som det mekaniska skjuvbrottet. Vid ogynnsamma geologiska förhållanden kan uppsprickningen av injekterade sprickor fortskrida långt ut i kringliggande bergmassa. Enligt de, i projektet, utförda numeriska modelleringarna kan uppspräckning uppträda upp till dubbla tunneldiametern från tunnelperiferin.

I en nyligt publicerad artikel "Strengthening the case for grouting" (Barton et al, 2001/2002), framförs dock att den förstärkande verkan av utförd förinjektering är betydande. Enligt författarna framförs att förinjektering med ny teknik avseende material och utförande väsentligt kan förbättra bergkvaliteten ur stabilitetssynpunkt. Som exempel ges att klassificerad bergklass enligt Q-systemet förbättras ett steg (en bergklass högre) vid torra förhållanden, medan klassificerad bergklass enligt Q-systemet förbättras två till tre klasser vid våta förhållanden. Som praktiska exempel på detta anförs två tunnelprojekt i Norge; Baneheiatunneln och Storhaugstunneln som har likartade berggrundsförhållanden som i Sverige.

I det avslutade projektet "Numerisk analys av explosionslaster i bergtunnlar" bedrevs arbete med fokus på att:

- Demonstrera hur dynamisk numerisk analys kan utföras med avseende på explosionslaster i bergtunnlar enligt Tunnel 99.
- Undersöka tillämpligheten i angivna belastningskrav enligt Tunnel 99 med avseende på dynamisk numerisk analys för bergtunnlar.
- Undersöka det bärande huvudsystemets bärförmåga för tre olika belastningsfall i "typiskt svenskt kristallint berg" med avseende på explosionslaster enligt Tunnel 99.

Detta FoU-projekt drevs av Vägverket med Lars Rosengren, Rosengren bergkonsult, som forskarresurs. Resultaten från föreliggande FoU-projekt bedöms kunna:

- Utgöra del av underlag för konsekvensanalys, d.v.s. bedömning av i vilka fall som de i Tunnel 99 angivna belastningarna är kritiska för bärförmågan, med avseende på geometrier och bergmassans egenskaper.

- Utgöra underlag för eventuell omformulering av belastningskraven i Tunnel 99 med avseende på dynamisk numerisk analys för bergtunnlar.
- Utgöra del av underlag för handledning i dynamisk numerisk analys av bergtunnlar utsatta för explosionslaster enligt Tunnel 99.

Baserat på det arbete som redovisas i rapporten "Numerisk analys av explosionslaster i bergtunnlar" kan följande slutsatser dras:

- För att kunna utföra numeriska analyser av de explosionslaster som föreskrivs i Tunnel 99 måste en stigtid för tryckpulsens uppbyggnad tillämpas. Tunnel 99 medger att 10 % av den totala varaktigheten utnyttjas som tid för tryckuppbyggnad.
- Den dynamiska lasten med 0,1 MPa maximal tryckamplitud och 50 millisekunders total varaktighet (P1) kan utan problem appliceras i två- och tredimensionella numeriska analyser.
- Den dynamiska lasten med 5 MPa maximal tryckamplitud och 2 millisekunders total varaktighet (P2) kan appliceras i tvådimensionella numeriska analyser utan föregående filtrering. Erforderlig beräkningstid kan dock minskas radikalt genom frekvensanalys och filtrering av tryckpulsen. Tredimensionella analyser av lasten P2 erfordrar, med dagens kapacitet på datorer, sannolikt alltför långa beräkningstider för praktisk tillämpning i byggprojektsammanhang.
- Den storskaliga stabiliteten runt tunnarna är tillfredsställande för de förutsättningar under vilka analyserna genomförts. Den dynamiska lasten P1 orsakar inte några tillkommande skador i bergmassan utöver de som genereras vid tunnarnas utbrytning. Vid applicering av den dynamiska lasten P2 kan dock tillkommande skador i bergmassan förväntas med efterföljande lokal nedsättning av bergmassans hållfasthet. Då lasten P2 appliceras i taket sker plasticering ända upp till bergöverytan. Utförda modeller har inte tagit hänsyn till minskad hållfasthet då berget plasticeras.
- Bultarnas bärförmåga är tillfredsställande. Då lasten P2 appliceras i pelaren induceras en kraftig ökning av bultlasterna i de bultar som installerats från närliggande tunnel. I övriga studerade belastningsfall genereras endast små öknings. Maximal bulttöjning, oavsett belastningsfall, uppgår endast till 0,5 % (d.v.s. 1/10 av bultarnas töjningskapacitet).
- Den dynamiska lasten P1 orsakar inga tillkommande skador i sprutbetongen. Vid applicering av lasten P2 i pelarväggen är sprutbetongens verkningssätt huvudsakligen "membranverkan" med höga dragpåkänningar och uppsprickning som följd. Omfattningen av skadorna i sprutbetongen kan förväntas bli ungefär lika stora på båda sidorna av pelaren. Då lasten P2

appliceras i taket induceras främst tillkommande skador i sprutbetongen i den tunnel som lasten appliceras i. Närliggande tunnel påverkas i mycket liten omfattning.

- En vidhäftningshållfasthet på 0,5 MPa mellan berg och sprutbetong är tillsammans med förankring av sprutbetongen i bultarna tillräckligt för att sprutbetongen inte skall falla ned.
- De båda materialmodellerna för sprutbetongen ger liknande skadebild. Den elastiska materialmodellen överskattar dock sannolikt utbredningen av skadorna, medan den oelastiska modellen underskattar dem. När det gäller de olika materialmodellernas bidrag till stabiliteten är förhållandet det omvända, nämligen att den elastiska modellen ger en överskattning av den stabiliserande effekten, medan den oelastiska ger en underskattning.
- Använd analysmetod (kontinuum) och materialmodell (elastisk-idealplastisk) kan utgöra begränsningar i modellen som överskattar det simulerade systemets stabilitet.
- Den tvådimensionella representationen utgör sannolikt en konservativ förutsättning som överskattar de potentiella skadorna såväl i bergmassan som i förstärkningen.

4.1.3.3 Behov av FoU

Trots de konstaterade utmaningarna/ svårigheterna som följer med en sannolikhetsbaserad dimensionering för bergkonstruktioner visar sig enligt slutsatserna i projektet ”Sannolikhetsbaserad dimensionering vid bergbyggande” intressanta fördelar och möjligheter att gå vidare. Problemets komplexitet och svårighetsgrad gör att en samlad insats erfordras.

För fortsatt forskning avseende sannolikhetsbaserad dimensionering av bergkonstruktioner bedöms följande insatser/ frågeställningar som relevanta och önskvärda:

- Utveckla och anpassa de sannolikhetsbaserade metoderna till de förutsättningar som gäller för konstruktioner i berg (en sammanhållen teori som på stringent sätt kan beakta de olika typerna av osäkerhet saknas varför ett sådant projekt är centralt)
- Studera bärighetsproblematiken hos en samverkande bergmassa och applicerad förstärkning (bärighetsproblematiken är till sin natur helt central inom frågeställningen sannolikhetsbaserad dimensionering av konstruktioner i berg.)
- Studera vilka acceptanskrav som bör tillämpas vid olika typer av lastfall och konstruktioner i berg.
- Studera användning av observationssystem för konstruktioner i berg (erfarenheterna från användning av observationssystem visar att detta kan vara ett mycket kraftfullt instrument för

dimensionering. Det saknas dock en tydlig koppling och förståelse hur det skall infogas i en sannolikhetsbaserad dimensionering).

Avslutningsvis är det önskvärt att klargöra vilken påverkan den europeiska harmoniseringen, styrd av Byggproduktdirektivet, får på dimensionering generellt och på sannolikhetsbaserad dimensionering specifikt, avseende bergkonstruktioner.

De genomförda försöken, inom projektet ”Dimensionering av stålfiberarmerade konstruktioner i sprutbetong vid bergförstärkning” som förenklat simulerade en plan bultupphängd sprutbetongförstärkning, visar på att fler faktorer måste beaktas vid bedömning av bärförmågan hos en bergförstärkning tillverkad av fiberarmerad sprutbetong. Bland annat har verkliga geometrier och utformning av förankringar stor betydelse. Den faktiska belastningssituationen i form av last och/eller deformation måste också beaktas. För fortsatt forskning avseende stålfiberarmerad sprutbetongs verkanssätt/ bärförmåga bedöms följande insatser som relevanta och önskvärda:

- Analysera hur skrovligheten, vidhäftningen, olika antagna styvheter hos bergmassan, tvång, lastförutsättningar mm kan påverka förstärkningen.
- Klarlägga vilka egenskaper fiber och betong bör ha för att erhålla önskat resultat i förstärkningen. Hänsyn måste tas till att verknings sättet kan vara olika beroende på om lasten tas upp genom plattverkan, valvverkan, samt om samverkan mellan berg och betong kan antas eller ej etc.
- Utredda om krympning och krypning kan reducera effekten av valvverkan. Det är viktigt att kunna bedöma storleksordningar och i vilken mån valveffekten bör inkluderas i analyserna.
- Bedöma brickans utformning och storlek för att eliminera risken för ett genomstansningsbrott. Ett område där kunskaperna är bristfälliga vad gäller fiberarmerad betong. Detta är viktigt för bedömningen av brickans funktion.
- Småskaliga och fullskaliga försök på bultad fiberarmerad sprutbetong, dels på jämn och ojämn yta. Försök under realistiska förhållanden och vars utformning tas fram som följd av utredningar enligt 1-4.
- Utveckla teoretiska modeller som kan beskriva bärförmågan.

Baserat på slutsatserna i rapporten ”Numeriska analys av explosionslaster i bergtunnlar” kan följande rekommendationer ges för eventuellt fortsatt arbete, inom ett område som bedöms som relevant och viktigt för Vägverket:

- Undersöka bärförmågans känslighet med avseende på materialmodell för bergmassan vid applicering av lasten P2 i taket och i pelaren. Härvid rekommenderas en materialmodell som kan ta hänsyn till att hållfastheten reduceras då bergmassan skadas ("strain softening").
- Undersöka bärförmågans känslighet med avseende på analysmetod, d.v.s. analysera effekten av att sprickor simuleras explicit.
- Undersöka bärförmågans känslighet med avseende på bergmassans kvalitet vid applicering av lasten P2 i taket och i pelaren. Undersöka bärförmågans känslighet med avseende på problemgeometri, t.ex. pelartjocklek och bergtäckning.
- Vidareutveckla den oelastiska materialmodellen för sprutbetongen så att den kan representera en avtagande bärförmåga som funktion av vinkeländring och axiell deformation.
- Verifiera modellresultaten genom jämförelser med fältförsök.

I Vägverkets projekteringsanvisningar för Ringen/Yttre Tvärleden i Stockholm förekommer en tabell där den skadezon som olika sprängämnen åstadkommer bedöms med utgångspunkt från laddningskoncentrationen (kg D_xM/m). En tidigare variant av tabellen har i nästan 15 år använts som undervisningsmaterial, för design och i bygghandlingar för skonsam sprängning av främst tunnlar. En enklare version av tabellen har publicerats i AnläggningsAMA 98.

Underlaget för tabellen i form av verkliga skadezonmätningar är emellertid bristfälligt. Tabellen tar vidare inte hänsyn till faktorer som frikopplingen, vatten i hålet mm. Den täcker inte nya tekniska omständigheter som håldiametrar större 51 mm, bulkemulsionssprängämnen och samtidig upptändning med elektronisprängkapslar.

Senare studier (Ouchterlony och Olsson, 2000) har påvisat vilka begränsningar tabellen och den underliggande svängningshastighetsansatsen har. Dessa studier ger referenser till relevanta undersökningar, främst skadezonmätningar, och diskuterar avvikelserna. En viktig slutsats som dras är att det är dags att komplettera den befintliga skadezonstabellen utifrån ny, befintlig kunskap.

Det är av största vikt att Vägverket, som beställare och förvaltare, tillsammans med branschen tar fram en aktuell skadezonstabell baserad på ny kunskap eftersom den sprängningsinducerade skadezonen påverkar både dimensioneringen av bergtunneln, där skadezonen ingår både som last och samverkande förstärkning, och den kommande förvaltningen av tunneln. En tunnel utförd med skonsam sprängning med en begränsad

skadezon genererar en mindre underhållsinsats jämfört med en tunnel med en betydande skadezon.

4.1.4 **Betongtunnel**

Efter de senaste årens projektering och byggande av ett antal betonginklädda tunnlar i Sverige; Hallandsåsen, Citytunneln och Tunnel vid Grind, har ett antal centrala frågeställningar kring denna konstruktion, som kombinerar berg- och betongteknik, ställts. I föreliggande förstudie behandlas ej täthetsaspekterna för en betonginklädd tunnel utan enbart bärighetsaspekterna som dock inkluderar last med avseende på vattentryck.

Vid ett seminarium, anordnat i augusti 2000 av SveBeFo, diskuterades aspekter avseende "Betonginklädnad av tunnlar" för att belysa behovet av kunskapsuppbyggnad och forskning för betonginklädnader. Vid detta seminarium ställdes ett antal frågor som till stor del återkommer i följande kapitel, bl.a. vilka laster man bör räkna med. Ett viktigt bidrag var den jämförelse som gjorts mellan skandinavisk och kontinental praxis där den kontinentala betonginklädnaden normalt syftar till att lösa ett stabilitetsproblem och där den skandinaviska lösningen syftar till att lösa ett miljöproblem. Detta medför i sin tur att kontinentala betonginklädda tunnlar oftast utförs dränerade medan skandinaviska tunnlar utvecklas mot odränerade lösningar ("Scandinavian and Continental Tunnelling Practice, A comparison of Solutions for Waterproofing". Steiner, Malmtorp och Rosengren).

I SveBeFos pågående ramprogram har planerats för att göra en systematisk inventering och värdering av europeiska respektive svenska normer och teknik för betonginklädnader med bakomliggande resonemang, för att se i vilken mån utländsk teknik är tillämpbar för svenska behov. Denna inventering planerades på ett tidigt skede att ingå som en central del i föreliggande förstudie. Denna inventering genomförs dock först under år 2002.

Vidare har det under året verkställts en ny betongstandard samtidigt som BRO 94 är under revidering. I vilken omfattning dessa revideringar har konsekvenser på kravtext i Tunnel 99 och för projektering och utförande av betongtunnlar och betonginklädda tunnlar, är i nuläget inte klarlagt.

Nedan följer en kort beskrivning av problemställning, utförd FoU och behov av FoU inom området Dimensionering av Betongtunnel

4.1.4.1 **Problem**

En av de centrala frågorna avseende dimensionering av betonginklädda tunnlar med avseende på bärighet, är hur man definierar ovanliggande berglast. För denna typ av konstruktion utgör berget både en last och ett stödjande element.

Konventionell förstärkning i tunnlar i bra berg med samverkande konstruktionsdelar (berg, bult, sprutbetong etc.) beräknas normalt med

hänsyn tagen till tyngden av den ej inspända löskärnan under trycklinjen (enligt valvbildning) i taket. Zoner med dragspänningar i väggar brukar också förstärkas, liksom block som har en rörelsemöjlighet mot tunneln. Vid partier med liten bergtäckning kan en betonginklädnad få funktionen att öka takets momentstyvhet, i samverkan med berget.

En betongtunnel genom jord eller helt omvandlat berg där samverkan med berg inte kan tillgodoräknas, kan betraktas som ett rör i mark. Med geotekniska principer skulle jordtrycket mot en sådan jordtunnel sättas lika med tyngden av ovanförliggande jord, eventuellt reducerat med en faktor som tar hänsyn till viss valvverkan genom jordens inre friktion.

Erfarenheten från tunneldrivning genom svagt berg med tunna, sprutbetongskal som driftsförstärkning, visar emellertid att dessa lastförutsättningar knappast är relevanta i alla tunnlar och att de således ej direkt kan användas för dimensionering av betonginklädnad. Modeller för analys av last från överliggande bergmaterial finns framtagna baserade på valvbildningsteori samt bergmassans hållfasthetsegenskaper, den första framtagen av Terzagi 1946, men det kvarstår dock stora frågetecken kring deras relevans för svenska förhållanden.

Bestämningen av bergmassans hållfasthetsegenskaper baseras vanligen på en klassificering (RMR, Q, RMI etc.) som leder till parametervärden i de idag använda modellerna. Detta kan exempelvis genomföras med RMS-metoden (Stille) eller GSI-metoden (Hoek). Sambanden är empiriska och speciellt vid dåliga bergförhållanden ($Q < 0,1$) är osäkerheten stor.

Lasten från bergmassan mot betonginklädnaden beräknas normalt med totalspänningsanalys bestående av både effektivspänningar (spänning som överförs via kontakt mellan korn i en bergart eller block i en bergmassa) och vattentryck. En odränerad tät betonginklädd tunnel dimensioneras för fullt vattentryck som är lätt att definiera. Vid en dränerad konstruktion, exempelvis en tunnel med en öppen sula, är det dimensionerande vattentrycket inte helt enkelt att bestämma. Utanpåliggande dränsystems förmåga att reducera vattentrycket samt risk för igensättning är svårbestämda faktorer som påverkar den faktiska lastverkan.

En betonginklädnad (med eller utan membran) skall enligt Tunnel 99, avsnitt 3.3.4.7, dimensioneras för en extrem blocklast av storleken 60 kN, vertikalt verkande inom en yta med basmättet 1 * 1 meter. Efter särskild utredning kan andra lastvärden väljas samt hänsynstagande till andra tunneldimensioner göras. Vid en extremt konservativ analys kan storleken på bergblocket teoretiskt beräknas utifrån hållfasthetsparametrarna för bergmassan och den kil som (teoretiskt) skulle kunna bildas i taket för det aktuella tunneltvärsnittet. Dessa två ytterligheter med avseende på olyckslast från extrem blocklast, kan vid

stora tunneltvärnsnitt skilja sig avsevärt åt, vilket tydliggör osäkerheten i precisionen på definitionen av dessa olyckslaster.

Identifikation samt definition av lokalt verkande is-/ tjältryck samt tryck från förekommande lerzoner är andra områden där kunskapen inte är fullständig.

I Tunnel 99, avsnitt 2.6.4, anges att "Bärande huvudsystem och inredning skall normalt kunna inspekteras på handnära avstånd". Vidare anges att "Inspektion av mot bergyta motgjuten inklädnad eller tättslutande insprutad drän anses ge tillräcklig information om tillstånd hos bakomliggande bärande huvudsystem". En motgjuten betonginklädnad mot berg anses uppfylla dessa krav om den är utförd utan tättslutande membran. Huruvida en tät tunnel med en relativt tjock membran- och geotextillösning uppfyller kraven på inspektionsmöjlighet är i nuläget inte helt klarlagt. Orsaken är att ett tjockt membran kan deformeras av bakomliggande rörelser i berget, i sådan omfattning att detta inte kan identifieras vid inspektion av tunnelns insida, och på så sätt "maskera" tidiga och kritiska signaler på att instabilitet i det bärande huvudsystemet föreligger.

Tunnel 99 bygger på det norm- och standardsystem som gällde för den nu utgående Bro 94. Övergången till "nya Bro 94" under 2002 och den där använda uppsättningen av standarder för betong, SS-EN 197-1 med tillhörande svenska tillämpningsstandarder, gör att stora delar av kravtexten för betong i Tunnel 99 måste revideras för att passa i det nya beskrivningssystemet för betong.

Grundläggning och sökring mot uppflytning är en generell problemställning för betongtunnlar och anslutande trågdelar. Flera helt olika lösningar kan väljas mellan och bättre kunskaper behövs som stöd för detta val. Exempel på frågeställningar är: hur styv bör de aktuella tunneldelarnas grundläggning vara och vilken teknisk lösning bör användas för säkring mot uppflytning. En utvärdering av utförda objekt bör göras som stöd för att rekommendationer formuleras.

Erfarenheter från de tunnlar som nyligen byggts i Sverige visar att vi inte har tillräcklig teknisk nivå inom området "vattentät betong". För gjut- och rörelsefogar finns en mängd olika lösningar för vattentätning, frågan är hur kunskapen om olika lösningars för- och nackdelar förmedlas till konstruktörerna. Arbetsutförandet kräver dessutom speciell noggrannhet, vilket inte alltid har visat sig vara fallet. Det kan behövas mer informationsspridning från andra källor än leverantörer för att få en erfarenhetsåterföring som kan ge bättre konstruktioner i framtiden.

Inläckning i sprickor är ett problem i alla applikationer där betong används för att hålla vatten på en sida om en konstruktion, vilket medför att stor vikt måste läggas på analyser av betongens krympning, orsakad dels av temperaturförlopp vid härdningen och dels av cementens dehydratation. Denna analys är också viktig för en betonginklädnad som ska förhindra dränering eftersom redan en liten minskning av betonginklädnadens storlek ger en stor strömningsarea i glappet mellan betong och berg.

Dimensionering av betongkonstruktion för brandpåverkan beskrivs i avsnitt 4.2.1.1.

Dimensionering av betongkonstruktioner för dynamisk explosionslast är, i princip, samma problemställning som den som beskrivs i 4.1.3.1. Då det bärande huvudsystemet utgörs av betong, d.v.s. då en betongtunnel skall dimensioneras hänvisas projektören till VST:s publikation ”Explosionslast vid betongtunnlar”, ANV 0187 för att få råd avseende beräkningsmetod. Denna anvisning bygger på en förenklad modell för beräkning av moment och deformationer med hjälp av energibetraktelser. I dagsläget saknas dock tillräcklig kunskap om metoden för att verifiera rotationskapacitet som används i den förenklade modellen. Vidare saknas en modell för dimensionering med avseende på tvärkraft. Slutligen saknas tillräcklig erfarenhet av dimensionering för utföranden med en ”inte enkel” geometri eller där omgivningsförhållandena är sådana att konsekvenserna vid brott blir stora.

Följande viktiga moment bör studeras

- Vilka olycksscenarier är rimliga att förutsätta
- Vilka dimensionerande laster och andra förutsättningar uppstår i dessa fall
- Hur säkras byggnadsdelarnas och installationssystemens bärförmåga och funktionssäkerhet vid de dimensionerande förhållandena
- Vilka restriktioner eller andra åtgärder behövs för att i driftskedet säkra antagandena om förutsatta olycksscenarier och möjligheterna till räddningsåtgärder

4.1.4.2 Utförd FoU

Vid planläggningen av föreliggande förstudie avsågs en aktiv medverkan i SveBeFos planerade systematiska inventering på området, för att på så sätt optimera Vägverkets resurser samtidigt som ett högkvalitativt resultat skulle kunna infogas i denna förstudie. På grund av de upprepade förseningar som SveBeFos inventering undergått, har inte den planerade inventeringen av internationellt pågående och avslutad FoU på detta område kunnat inkluderas.

SveBeFos aktuella inventering kommer dock att genomföras under våren 2002 med ett startmöte den 10 december 2001.

Dimensionering för brand redovisas i kapitel 4.2.2.1. Vägverket deltar aktivt i den forskning som bedrivs Brandforsk.

Explosionslaster och infrastrukturkonstruktioner – Risker, värderingar och kostnader presenterades i en licentiatavhandling 1999, utförd av KTH med Elisabeth Ahlenius som forskarresurs. Avhandlingen syftade till att öka förståelsen för explosionsrisker för infrastrukturkonstruktioner och att vidareutveckla metoder för dimensionering för explosionslaster så att en tekniskt och ekonomiskt balanserad dimensionering kan genomföras. Avhandlingen byggde på litteraturstudier av ett antal aspekter av explosioner som inträffar inom transportnäringen och som ger upphov till luftstöt vågor. Studerade områden var bl.a.

- Statistik över inträffade explosioner
- Explosionslastens storlek
- Uppskattning av frekvens för händelse med explosion i vägtunnel
- Konsekvensanalyser
- Generella principer för dimensionering av ett typiserat betongtunneltvårsnitt
- Datorsimuleringar har genomförts för fallen att ca 300 kg trotyl respektive ett gasmoln exploderar

Slutsatser är att sannolikheten för en explosion är mindre än det som i de kommande europeiska dimensioneringsreglerna rekommenderas för en dimensionerande olyckslast. Överslagsberäkningarna har visat att en typisk betongtunnel kan motstå de laster som analyserats. En seg och överbestämd konstruktion med stor massa och relativt litet armeringsinnehåll är till fördel när det gäller att ta upp dynamiska stötlaster.

4.1.4.3 Behov av FoU

Behovet av FoU-insatser på detta område presenteras i kapitel 5.2.

4.1.5 Inredning och installationer

4.1.5.1 Inklädnad

Inklädnader används i vissa fall för att skapa en bra miljö i tunnelns trafikutrymme. Livslängdskrav och säkerhetsnivåer kan vara lägre än för de byggnadsdelar som ingår i det bärande huvudsystemet.

Lastförutsättningarna kan också vara speciella. Med dessa skillnader utförs dimensioneringen för bärförmåga på samma sätt som studerats i avsnitten ovan.

Inklädnader för vatten- och frostsäkring studeras i en separat förstudie ”Tätning och frostsäkring av tunnlar (Vägverket 2002).

Konstaterade problem finns med bl.a. utmattning av infästningsbultar. Kunskap om laster orsakade av luftstötter från fordon samt is och tjälning är otillräcklig. Beräkningsmodeller för olyckslaster är bristfälliga speciellt med avseende på brand och påkörning.

4.1.5.2 Vägkonstruktion

För dimensionering av tunna vägkonstruktioner på betongplattor i tråg och tunnlar saknas idag tillräcklig kunskap. Ett flertal fall finns med oacceptabel blåsbildning.

4.1.5.3 Installationer

Vid dimensionering av installationers bärförmåga är infästningar speciellt intressanta. Förutsättningarna för och samordningen av dimensioneringen är ett potentiellt problemområde som dock inte bedöms vara av hög dignitet.

I den avslutade rapporten ”Undersökning av tunnelmiljöns korrosiva egenskaper” (Korrosionsinstitutet, 2001) konstaterades att korrosiviteten i vägtunnlar är hög vilket påverkar installationernas livslängd. Den korrosiva miljön i vägtunnlar beror främst på kombinationen saltning och smuts. Gasformiga föroreningar har en marginell inverkan. Det finns sannolikt ett direkt samband mellan trafikintensiteten och korrosiviteten i en tunnel. Hög trafikintensitet ger hög korrosivitet. Även om korrosiviteten är högst nära vägbanan och vid infarten så blir korrosiviteten med tiden förvånansvärt hög i hela tunneln

Regelbunden tvättning har en mycket positiv inverkan på detaljers livslängd. Utförs ingen tvättning av högre belägna konstruktioner så blir korrosionsmiljön där med tiden nära nog likvärdig med den för regelbundet tvättade ytor nära vägbanan.

4.2 Brandskydd

Kunskap kring brandskydd och utrymning av tunnlar är mycket aktuell eftersom det har inträffat ett flertal stora brandkatastrofer i tunnlar under de senaste åren. Även om dessa katastrofer inte hade inträffat är kunskap om brandskydd mycket viktig för att uppnå önskad säkerhetsnivå för tunnlar. Noggrann analys av de rapporter som finns från brandkatastroferna är viktiga för att ta fram nya forskningsområden. De visar tydligt var det brister i säkerheten.

FN's särskilda expertgrupp om säkerhet i vägtunnlar har nyligen presenterats i en rapport, ”Recommendations of the group of experts on safety in road tunnels. Final report” (FN, 2001). I denna presenteras förslag till ett stort antal åtgärder för att höja säkerheten i vägtunnlar.

Två mindre litteratursökningar har genomförts för att samla in kunskap om FoU-insatser avseende brand i tunnlar och för att identifiera områden med de stora kunskapsbristerna idag. Dessa två litteratursökningar har utförts av Sveriges Provnings- och forskningsinstitut, Enheten för brandteknik och av Brandskyddslaget. Rapporterna från dessa studier finns redovisade i sin helhet i bilaga 1 och 2. Litteratursökningarna är en fortsättning på en tidigare litteraturstudie utförd av Ingason, Bengtsson och Hiort under 1997 (finansierad av BRANDFORSK och Vägverket). Resultat från dessa litteratursökningar har kompletterats med ytterligare referenser för att få en så bred kunskapsbild som möjligt.

Litteratursökningen har omfattat följande delområden:

- Brandlaster
 - Bärförmåga vid brand
 - Datorverktyg för dimensionering
- } ⇒ Dimensionering (Fire resistance)
- Materialval
- ⇒ Materialval (Reaction to fire)
- Brandventilation
 - Aktivt brandskydd
 - Branddetektion
 - Utrymning
 - Brandbekämpning
- } ⇒ Brandskydd (Fire protection)

Nedan följer en kort beskrivning av problemställning, utförd FoU och behov av FoU inom områdena branddimensionering, materialval och brandskydd.

4.2.1 Problem

4.2.1.1 Branddimensionering

Brandlaster

Det råder fortfarande stor osäkerhet kring vilka brandlaster som skall användas vid dimensionering av tunnlar. Det finns standardiserade brandkurvor (den s.k. ISO 834 Standardbrandkurvan, hydrokarbonkurvan, HC-kurvan och RWS-kurvan) som används men man ska vara medveten om att den mest tillämpade brandkurvan, ISO 834 är framtagen för att efterlikna en brand i ett rum. Tunnelutrymnet skiljer sig från rumskonfigurationen och mängden brännbart material i tunnlar (framförallt fordon och deras last) är större än i ett rum vilket gör att andra brandlaster än standardbrandkurvan behövs som ett komplement.

Bärförmåga vid brand

De senaste brandkatastroferna har visat på att bärförmåga för det bärande huvudsystemet vid brand inte har varit en kritisk faktor. Det är endast vid branden i Eurotunneln som hela konstruktionen var nära en kollaps, det var det omgivande bergets bärförmåga som gjorde att kollaps undveks. Detta pekar på att även om bränder i tunnlar har längre varaktighet än vad man tidigare antagit så är bärförmågan inte en kritisk faktor förutom då det gäller sänktunnlar eller tunnlar som går under byggnader. Brott har däremot skett i inredningsdelar och det finns anledning att analysera säkerhetskonceptet för att förebygga att sådana brott inte påverkar möjligheterna för utrymning eller räddningsinsats.

Spjälkning av betong vid brand nämns som ett område där ytterligare kunskap behövs. Enligt Haukur Ingason (bilaga 1) är det framförallt grundläggande forskning som behövs så att man kan förstå mekanismerna bakom fenomenet spjälkning. Det är först då som man kan beskriva spjälkningen på ett tillfredsställande sätt som man kan inkludera spjälkning i brandberäkningsmodeller.

I en litteraturstudie om betongavspjälkning utförd av FSD (Khoury och Anderberg, beställd av Vägverket) nämns att problem med explosiv avspjälkning har uppmärksammats först under senare tid, i samband med tunnelbränder, då stora betongskikt har förstörts. Enligt rapporten har viktiga framsteg gjorts inom framtagandet av de fundamentala mekanismerna som orsakar explosiv avspjälkning. Dessa indikerar två viktiga faktorer, dvs. ångtryck i porerna och termiska påkänningar hos betongen vid hastigt ökande temperatur. I denna studie understryks att metoder som finns, publicerade i standardverk, för att motverka explosiv avspjälkning, är otillräckliga.

Datorverktyg vid dimensionering

Det finns flera olika typer av datorverktyg för dimensionering av brandskydd i tunnlar. Det finns program för att beräkna brandspridning genom s.k. zon-modeller eller genom CFD modeller (Computational Fluid Dynamics). Det finns även datormodeller för beräkning av temperatur och bärförmåga hos konstruktioner exponerade för brand. Enligt Ingason finns det ett behov av att utveckla enkla endimensionella beräkningsprogram som kan användas för att undersöka rimligheten i beräkningsresultat från mer komplicerade beräkningsprogram.

Att ta fram eller utveckla datorverktyg ska normalt inte utföras eller finansieras av Vägverket utan denna typ av utveckling får de leverantörer som tillhandahåller datorverktygen stå för.

4.2.1.2 Materialval

Det är viktigt att de material som används i en tunnels inte bidrar till uppkomst av brand, brandspridning eller rökspridning. Detta krav finns specificerat i Tunnel 99, avsnitt 4.2.3. Utöver detta så finns det en rådtext som upplyser om att ingående material bör vara obrännbara om inte materialets bidrag till brandspridning kan anses vara försumbart.

Naturligtvis är det viktigt att det finns så mycket kunskap som möjligt kring de material som används i tunnelkonstruktioner. Man kan dock konstatera att några större problem vid val av material till tunnlar inte brukar förekomma. Däremot kan kravspecifikationerna på ingående delmaterial behövas förbättras och differentieras mer samt att verifieringsmetoder identifieras.

4.2.1.3 Brandskydd

Brandskydd kan delas in i flera delområden som alla behandlar skydd av personer och egendom i tunnlar. Inom detta område behandlas branddetektion, brandgasventilation, utrymning samt brandbekämpning av räddningstjänsten.

Branddetektion

En brand i tunnel detekteras oftast genom värmekännade detektorer. Nackdelen med denna typ av detektorer är att de är relativt långsamma. Rökdetektorer används inte i dagsläget eftersom de inte kan urskilja brandrök från vanliga avgaser från dieselfordon. Utveckling pågår för att ta fram system för att automatiskt urskilja bränder med hjälp av TV-övervakning men denna utveckling är inte klar än.

Att ha ett tillförlitligt detekteringssystem som reagerar snabbt är viktigt för att kunna starta evakuering och brandbekämpning snabbt.

Brandbekämpning

Brandbekämpning handlar både om räddningstjänstens insats vid en tunnelbrand och de egna system för brandbekämpning som kan finnas monterade i en tunnel (t.ex. sprinkler och handbrandsläckare).

Då det gäller räddningstjänstens insats (speciellt ledning och styrning) vid en tunnelbrand så är man medveten om att en sådan insats till stora delar avviker från en insats vid en brand i en byggnad, men några studier för detta finns inte rapporterade. I bilaga 1 redovisas problem som kan uppstå vid en räddningsinsats i tunnel.

Aktivt brandskydd

Sprinkler i vägtunnlar är ett sätt att skapa ett aktivt brandskydd. Det råder dock mycket delade meningar om sprinkler är ett effektivt sätt för att stoppa eller begränsa en tunnelbrand. Motståndarna hävdar att sprinkler inte kan nå det brinnande materialet i ett fordon medan de som förespråkar sprinkler hävdar att huvudsyftet med sprinkler är att förhindra brandspridning mellan fordon. Den mest vanliga åsikten inom vägtunnelbranschen är beskriven i NFPA 502, "Standard for road tunnels, bridges and other limited access highways", 1998.

Brandventilation - brandgaskontroll

Vid en tunnelbrand utvecklas rökgaser, som begränsar siktmöjligheter för personer i tunnlar och som dessutom är giftiga. Mängden rökgaser som utvecklas beror på många faktorer, bland annat syremängden vid

branden, värmeavgivningen, konvektion (värmetransport genom strömning i gas eller vätska), tunnelns lutning, ventilationssystemets utformning, vindstyrka och vindriktning.

Sikt i en tunnel där en brand pågår är en viktig parameter både för utrymmande trafikanter och för räddningstjänstens personal. I studien av Bengtsson och Nyman finns två referenser som behandlar beräkningsmetoder för hur siktförhållandena påverkas av brandrök.

Tunnelventilation kan utformas som naturlig ventilation eller olika typer av mekanisk ventilation (längsventilation, tvärgående ventilation eller olika varianter av tvärgående ventilation). De olika systemen beskrivs i litteraturstudierna (bilaga 1, 2 och SP rapport 1997:41). I Sverige används framförallt naturlig ventilation för korta tunnlar eller längsventilation för längre tunnlar.

Utrymning

Utrymning av vägtunnlar i händelse av en brand kan delas upp i flera olika moment. Det första är att trafikanter ska bli varse att det brinner i tunneln och att de behöver tid att reagera. Sedan tar det en viss tid att utrymma fordon och ta sig till utrymningsvägar. Slutligen måste man ta hänsyn till den tid som det tar för personer som utrymmer att ta sig till säker plats genom utrymningsvägar. Det finns stora brister i kunskapen om hur lång tid de olika delmomenten i en utrymning tar och därför är det svårt att optimalt utforma utrymningsvägar i en tunnel. Speciellt nämns kunskapsbristen avseende utrymningstid för att utrymma en buss.

Personer som blir inblandade i en olycka med brand ska ha möjlighet att på egen hand kunna utrymma till en säker plats. Kunskapen om de särskilda behov som funktionshindrade personer och barn har behöver i hög grad förbättras.

4.2.2 Utförd och pågående FoU

4.2.2.1 Branddimensionering

Laster och bärförmåga

Ett par stora FoU-projekt har utförts för att undersöka vilka brandlaster som är relevanta för tunnlar. Dels är det EUREKA-projektet (1995) där försök utfördes i en norsk tunnel, under perioden 1991-1992. I denna undersökning utfördes bl.a. ett brandförsök med en lastbil med möbler i lasten. Vidare utfördes en stor försöksserie i USA, Memorial Tunnel (1995), där man framförallt studerade rökgasspridning och olika ventilationsscenarier.

Spjälkning av betong vid höga temperaturer har på uppdrag av Vägverket studerats av FSD. I denna litteraturstudie "Concrete spalling review" (Khoury och Anderberg, 2000) framförs att om fibrer av polypropylen blandas i betong kan risken för avspjälkning reduceras eller helt elimineras. En annan intressant aspekt i denna rapport avseende

brandspjälkning är relaterat till användandet av högpresterande betong, som har låg permeabilitet och hög hållfasthet, och att det är just dessa faktorer som gör betongen mer känslig mot explosiv avspjälkning vid brand. Detta sägs bero på att den täta och ogenomträngliga betongen försvårar transport av vattenånga, vilket resulterar i en kraftig ökning av ångtryck i porerna. För att motverka avspjälkningsfenomenet hos högpresterande betong används generellt polypropylenfibrer och/eller termisk isolering.

World Road Association, PIARC, har tagit fram ett förslag till standardiserade brandlaster. Förslaget diskuteras nu inom olika internationella organ och i ett samarbete med International Tunnelling Association, ITA, studeras nu lämpliga konstruktionslösningar för dessa laster. En rapport väntas bli klar under 2002

Det pågår även ett svenskt forskningsprojekt med titeln "Brandbeständighet hos självkompakterande betong" som drivs av Skanska Prefab i samarbete med Lunds Tekniska högskola. Målet med projektet är att kartlägga hållfastheten och spjälkningsbenägenheten hos brandpåverkad självkompakterande betong. Användning av självkompakterande betong är speciellt gynnsamt vid betonginklädnader i bergtunnlar eftersom vibreringen är mycket svår att utföra vid denna typ av gjutning. I projektet ingår en litteraturstudie samt ett antal brandprovningar som ska genomföras på SP i Borås. Resultat från projektet förväntas presenteras tidigast juni 2002.

Inom det europeiska standardiseringsarbetet kan nämnas att det pågår ett arbete under titeln "Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1.2: General rules – Structural fire design" (prEN 1992-1-2, senaste utkast från dec 2001), samt "Eurocode 1: Actions on structures – Part 1.2: General actions – Actions on structures exposed to fire" (prEN 1991-1-2, senaste utkast från jan-2001, tidigare ENV 1991-2-2 med NAD). Dock omfattar ovannämnda Eurocodor betongkonstruktioner allmänt och inget nämns specifikt om betongkonstruktioner i tunnlar.

EU-finansierade forskningsprojekt och tematiska nätverk om tunnelsäkerhet har startats inom femte ramprogrammet. Inga resultat finns ännu.

Inom EU, Transport RTD Programme har *SAFESTAR Safety standards for road design and redesign*, genomförts. Detta innehåller en sammanställning av vägstandarder sett utifrån säkerhetsaspekterna och tunnlar ingår. Huvudmål för detta program är (i originalspråk):

"The overall objective of the project is the formulation of safety arguments for selecting certain design elements or for recommending certain dimensions. Main output of SAFESTAR will be recommendations for design guidelines or possible standards on the basis of road safety considerations. SAFESTAR will concentrate on roads that can be part of the TERN network, i.e. primarily motorways, express roads and major interurban roads. In addition, some attention will be devoted to urban conditions."

4.2.2.2 Materialval

Det finns inte rapporterat om något större sammanhängande forskningsprojekt som behandlar ett stort antal typer av ingående material i tunnlar utan istället utförs det ofta FoU-projekt som behandlar problematiken för en speciell produktgrupp.

Från SP rapporteras om ett stort EU forskningsprojekt som handlar om brand i kablar, FIPEC-projektet (Fire Performance of Electric Cables), som utfördes under åren 1996-1999. De flesta kablar som finns i en tunnel är viktiga för tunnelns säkerhet, det kan t.ex. vara kablar till belysning, ventilation, övervakningskameror och larmsystem. Undersökningen har visat att det bästa sättet att placera kablar i en tunnel är att lägga kablar i en kabelränna i vägbanan. Dock bör man beakta att det kan vara svårt att konsekvent genomföra detta eftersom mycket av de installationer som behövs för en tunnel är placerade i tunneltaket. FIPEC-projektet har även kommit fram till en rekommendation om avstånd mellan enskilda kablar på en kabelbrygga för att erhålla en så långsam brandspridning som möjligt. I undersökningen har man kommit fram till att det kritiska avståndet mellan kablar på en kabelstege, för att få en långsam brandspridning, är ungefär en kabeldiameter.

I Norge har man gjort försök med olika inklädnadsmaterial för att skydda PE-skum (polyetylenskum) som används som frostisolering i tunnlar. Att frostisolera med PE-skum är mycket vanligt i Norge och för att se hur man kan brandskydda materialet så har man undersökt olika lösningar med skyddsmaterial (t.ex. sprutbetong, lättbetong, brandskyddsmålning, stålfolie, stålskivor, aluminiumvalv, glasfiberduk, Promatect och sprinkleranläggning). I de dokument som refereras till i Ingasons rapport framkommer det inte vilka av de provade lösningarna som är godkända för brandskydd av PE-skum. Eftersom PE-skum har börjat användas i Sverige så är det mycket intressant för oss att följa utvecklingen i Norge. Möjligheten att driva samarbetsprojekt bör noga studeras.

4.2.2.3 Brandskydd

I de litteraturstudier som har gjorts i samband med denna förstudie har stora brister identifierats inom området brandskydd. Det är inte mycket forskning som pågår som är inriktat på bränder i tunnlar.

SP har tillsammans med FOA genomfört modellförsök avseende mekanisk längs- och frånluftventilation. Försöken visar att längsventilation tenderar att försämra frånluftventilationens effektivitet. Från försöken finns också en del information om hur frånluftsschakt bör utformas och vilka luftvolymflöden som krävs för att luften ska passera ut genom frånluftsschaktet.

Räddningsverket (SRV) startade 1998 ett projekt för att få ytterligare kunskap kring räddningstjänstens insatssituation i tunnlar och undermarksanläggningar. En förstudie blev färdig 1999. Huvudstudien startade år 2000 med ett arbete som hade inriktning mot planering och

genomförande av räddningsinsatser vid bränder i spårtunnlar (map. brandmiljön, utrymningssituationen och räddningstjänstens åtgärder). Denna studie har resulterat i en rapport med titeln "Räddningsinsatser vid tunnelbränder" (PUB P21-391/01). Rapporten (nov 2001) beskriver en tänkt olycka i en spårtunnel. Olyckan beskrivs utifrån tre perspektiv; brandförloppet, utrymningsförloppet och räddningsinsatsen. Under år 2002 ska projektet fortsatt fokusera på bränder i vägtunnlar.

Bengtsson och Nyman skriver i sin rapport att mycket lite forskning och utveckling görs med fokus på brandbekämpning. Ändå är detta ett område som är viktigt för att säkerställa att utrymning av tunnlar ska fungera samt att se till att en eventuell brand inte tillåts spridas okontrollerat och leda till onödigt stora konsekvenser för användare och förvaltare av tunnlar.

4.2.3 Behov av FoU

Här presenteras områden där forskningsbehov identifierats genom denna förstudie. I kapitel 5 av denna förstudierapport diskuteras de områden som prioriteras av Vägverket.

4.2.3.1 Branddimensionering

För att kunna uppskatta brandbelastningen i en tunnel krävs mer kunskap dels om en förväntad brands storlek samt om hur brand kan spridas mellan fordon i en brandsituation. Det konventionella sättet att använda tid-temperaturkurvor för att beskriva påverkan på konstruktionen kan behöva kompletteras med andra parametrar, exempelvis strålning.

Vid dimensionering av nya tunnlar är det viktigt att effekterna avseende avspjälkningen vid brand kan lösas, alternativt minimeras till en acceptabel nivå. Forskning bakom metoden att blanda fibrer av polypropylen i betongen (med reducerande/elimineringseffekt avseendespjälkning) är ännu i ett tidigt stadium men det finns tillräckligt med underlag för att kunna använda polypropylenfibrer i betong utsatt för brand. En annan metod som kan förhindra alternativt minimera effekterna av brandspjälkning, är termisk isolering. Man bör göra en utvärdering av dessa metoder för att kunna tillämpa dem.

Vidare bör en diskussion initieras avseende Eurocoderna, se 4.2.2.1. Provberäkning bör göras samt förslag tas fram om vilka kompletterande krav som behövs.

4.2.3.2 Materialval

Att kunna uppnå bättre kunskap om hur material uppträder i en brand (framförallt med avseende på värme- och rökutveckling) och vilka materialval som är möjliga är naturligtvis intressant. Men eftersom denna typ av undersökning väldigt lätt kan bli av karaktären produktutveckling så är det inte något som Vägverket bör prioritera.

Det kan dock vara intressant att ta fram rekommendationer avseende vilka provningar som ska utföras och vilken kravnivå som bör väljas. Inom detta område är det viktigt att vi använder oss av de standardiserade brandprovningssmetoder som finns och strävar mot att få en gemensam syn framförallt inom Europa. Detta arbete bör bedrivas i standardiseringsgrupper och genom internationellt samarbete tillsammans med egna smärre FoU-insatser.

4.2.3.3 Brandskydd

För att kunna dimensionera en tunnels brandgasventilationssystem krävs kunskap om dimensionerad brands storlek.

Brandgaskontroll nämns av Ingason som ett område som är mycket viktigt att forska kring. Här saknas bl.a. kunskap om grundprinciper för utformning av ventilationssystem för brandgaskontroll och kunskap kring styrning och aktivering av brandgaskontrollsystem vid räddningsinsats i tunnlar.

Enligt Bengtsson och Nyman finns det ingen litteratur inom området sprinkler i vägtunnlar. De nämner att man bör studera metoder som leder till effektiv utformning och verkanssätt av sprinklersystem vid tunnelbränder.

För att kunna dimensionera utrymningsvägar i en tunnel krävs kunskap om hur lång tid det tar för trafikanter att lämna sina fordon. Här saknas kunskap om varseblivning och reaktionstider samt tid för utrymning av t.ex. bussar.

Innan en räddningsinsats kan påbörjas så måste branden upptäckas på något sätt. Det finns automatiska system för brandövervakning med TV-övervakning men denna typ av produkt är inte färdigutvecklade än. En snabb detektion är viktig för att kunna påbörja en räddnings- och släckningsinsats. Dock ska noteras att detta område är mer av karaktären produktutveckling och således inte prioriterat för att stödjas av Vägverket.

Inom området brandbekämpning ska Räddningsverket under år 2002 fortsätta med sitt projekt att avhandla bränder i vägtunnlar. Den nyligen publicerade rapporten "PUB P21-391/01" måste studeras för utvärdering och eventuell ändring av kraven i ATB-erna.

Det är ett grundkrav att ventilationssystemen utformas så att de inte ökar brandeffekter eller förvärra situationen för utrymmande personer via rökgasspridning eller okontrollerad spridning. Vidare så är ledning och styrning av en räddningsinsats i en tunnel mycket olik den för bränder ovan mark vilket gör att detta område behöver studeras vidare. Slutligen saknas kunskap på hur säkerheten i tunnlar förbättras när det finns två tunnelrör med tvärförbindelser med ett givet avstånd emellan.

4.3 Miljö och hälsa

I denna förstudie ges enbart vissa kompletteringar till förstudien "Miljöanpassade tunnlar", 1999-12-30

4.3.1 Problem

Fordonsemissioner och slitageprodukter från vägbanan blir kvar inne i tunneln i större utsträckning än ute på öppen väg. Partiklarna binds av den högre fuktigheten och eftersom det inte förekommer något regn i tunnel sker heller inte någon bortsköljning av partiklarna. Detta innebär att ytvattnet samt det spolvatten som använts för tvättning av tunneln kan innehålla högre föroreningshalter än normalt vägdagvatten och anläggningen måste dimensioneras för detta. I samband med renovering av äldre tunnlar kan okontrollerat utsläpp av tvättvatten, som kan innehålla decenniers anrikningsprodukter, leda till en miljöchock för recipienten. Råd och regler för hur detta ska hanteras behöver tas fram. Erfarenheter från Norge samt från ombyggnaden av Vindötunneln kan vara mycket värdefulla i detta arbete.

Dimensionering av ventilationssystemet görs med utgångspunkt från krav på luftkvalitet i tunneln, krav på utsläpp till omgivningen, krav på buller och vibrationer samt krav på skydd mot brandgas- och brandspridning. Förutsättningarna för att kunna genomföra en tillräckligt noggrann ventilationsberäkning behöver definieras tydligare.

4.3.2 Utförd och pågående FoU

Under de senare åren har Vägverket deltagit i flera samverkansprojekt för att klarlägga hälsoeffekterna av luftföroreningar i tunnlar. Kvävedioxid har bedömts vara av primärt intresse och det kan även betraktas som indikatorsubstans för andra skadliga ämnen i fordonsavgaserna. Målet har varit att kunna fastlägga ett krav avseende NO₂-halt. Projektrapporter som tagits fram är; "Förstudie till FoU-ramprojekt Miljöanpassade tunnlar", 1999 och "Hälsoeffekter av trafikavgaser", Vägverket Publikation 2000:64

När det gäller luftkvaliteten i tunneln anges finns i Tunnel 99 ännu inga kravvärden på luftföroreningsnivåer med avseende på kvävedioxid. Under våren 2002 kommer ett kriteriadokument för kvävedioxid att färdigställas. Efter en kompletterande konsekvensutredning förväntas målvärden kunna fastställas. Behov finns av kriteriadokument även för andra luftföroreningar. I första hand bedöms små partiklar med diameter under 2,5µm (PM_{2,5}) vara intressanta att studera.

Projektet *Emissionsberäkningar för vägtunnlar* kommer under våren 2002 att ge entydiga regler för att beräkna mängden emissioner i en tunnel. Detta innebär att en stor osäkerhetsfaktor kan elimineras från ventilationsdimensioneringen.

4.4 Utformning och säkerhet vid användning

Området studeras inte i detalj i detta arbete, se förstudien "Personsäkerhet i tunnlar", 1999-03-23. Emellertid kan några övergripande kommentarer göras. De lösningar som väljs för att skapa säkerhet vid användning är i flera fall främst motiverade av att ge en god säkerhet vid brand. Dessa lösningar studeras under avsnittet om brand.

Kraven på säkerhet vid användning uppfylls i huvudsak genom en väl vald utformning av tunnels trafikutrymme.

Ett antal olika faktorer påverkar trafikutrymmets utformning och några är:

- Att trafikanterna upplever miljön som positiv och trygg
- Att fria rummet är tillräckligt
- Vägbanans linjeföring i plan och profil
- Att körfält och vägrenar har tillräcklig bredd
- Körbanans ytegenskaper; friktion, jämnhet och ljushet.

Nyttjandet av en tunnel skall vara säkert. Detta innebär att de risker som kan uppstå skall kunna hanteras systematiskt så att oönskade händelser inte inträffar. Om det trots detta inträffar en större olycka skall händelseförloppet kunna styras så att konsekvenserna minimeras. Ett första steg är att personer som befinner sig i tunneln kan utrymma under säkra förhållanden. Planering för att kunna genomföra en utrymning innefattar händelse-detektering, larmning, varseblivningstider, utrymning.

Områden där kunskaper om hela dimensioneringskedjan bör fördjupas är

- dimensionering av trafikutrymmet och speciellt kravdifferentiering med avseende på trafikmängd
- riskhanteringsmodell generell
- dimensioneringsmodell för behov av säkerhetsutrustning
- riskerna vid utsläpp av giftiga ämnen i samband med olycka
- utrymningsdimensionering.

För att kunna genomföra en tillräckligt bra dimensionering krävs dessutom fördjupad kunskap om

- förutsättningarna vid kritiska scenarier
- människors beteende vid olyckor och vid utrymning
- räddningstjänstens behov av utrymmen och fast utrustning för att kunna göra insatser vid kritiska scenarier.

4.5 Buller och vibrationer

I denna förstudie ges enbart vissa kompletteringar till förstudien "Miljöanpassade tunnlar", 1999-12-30

Vid byggande av trafikleder i större städer används tunnlar i allt större utsträckning. Den relativt sett större kostnaden för tunnelalternativet uppvägs i många fall av de positiva effekterna för staden och dess invånare i form av minskat buller, mindre emissioner, mindre barriäreffekter och möjligheter att nyttja vägområdet för andra verksamheter. Denna vinst är svår att prissätta och därmed också svår att vägas in i de tidiga planeringskedena när alternativa trafiklösningar studeras. Mer utvecklade modeller för detta är önskvärt.

Under byggskedet kan problem uppstå i form av buller eller vibrationer och detta kan vara störande för de som bor eller uppehåller sig i närheten. För att minska trafikantkostnader och minimera den totala byggtiden, det vill säga kortare störningsperiod, är det önskvärt att byggnadsarbetet kan bedrivas dygnet runt. Eftersom buller och vibrationer upplevs mycket mer störande under nattvilan är dessa önskemål svåra att uppfylla. En förutsättning är då att precisa och pålitliga modeller för att prognostisera uppkomna nivåer för buller och vibrationer (speciellt avseende stomljud vid borrning) finns för projektering av anläggningen och för planering av byggandet. Så är emellertid inte fallet.

De byggmetoder som idag används är effektiva och väl utvecklade för att få en snabb framdrift. Som en följd av detta ger de ofta större och tyngre maskinerna även högre buller och vibrationsnivåer. Tydligare krav bör tas fram av myndigheter och byggherrar så att tillverkare och entreprenörer även kan ta in dessa krav i utvecklingen av maskinparken.

Buller från punktkällor som tunnelmynningar och ventilationsöppningar kan i ogynnsamma fall bli störande för de boende i omgivningen. Råd bör formuleras om hur sådan bullerberäkning kan genomföras.

Vid olyckor kan höga bullernivåer, till exempel från rökgasventilatorer, påverka hörbarheten av larm och andra meddelanden samt störa kommunikation under utrymnings- och räddningsfaserna. Erforderliga krav bör utvecklas i anslutning till de FoU-projekt som bedrivs för att öka säkerheten vid brand.

4.6 Energihushållning

I en tunnelanläggning förbrukas relativt mycket energi för belysning, ventilation, pumpar och övriga installationer. En systematik/handbok behövs för att kunna projektera installationerna så att energiförbrukningen kan vägas in i totalbedömningen. Ett exempel är att erforderliga ljusnivåer kan minskas om ljusraster byggs vid tunnelmynningarna men portalens arkitektur och färgsättning har även betydelse.

4.7 Tillgänglighet

För att de funktionshindrade ska kunna använda vägtunnlarna krävs att deras speciella behov analyseras och förs in i regelverken. Vägverket gör detta genom att arbeta inom följande områden:

- genom samverkan och samråd skapa förutsättningar för funktionshindrades delaktighet och jämlikhet inom vägtransportsystemet
- undanröja hinder för funktionshindrade att använda vägtransportsystemet
- ställa krav på tillgänglighet från början, när fysisk miljö planeras, projekteras och byggs
- göra information och dokumentation tillgänglig

Vid en eventuell olycka ska de inblandade kunna rädda sig själva bort från olycksplatsen och till en säker plats. Utrymningsvägar ska därför anpassas till de funktionshindrades behov. Inom detta område har det gjorts en del men ytterligare kan göras.

5 Förslag till angelägna FoU-projekt

Här följer en kortfattad beskrivning av ett antal angelägna FoU-projekt inom problemområdet ”Dimensionering av tunnlar”. Syftet med att initiera dessa projekt är att säkerställa kostnadseffektiva tunnlar med bibehållen säkerhet genom en ökad kunskapsnivå.

De nedan föreslagna FoU-projekten är grupperade enligt föreliggande förstudies kapitelstruktur.

Inledningsvis understryks dock att för att kunna göra en övergripande ekonomisk sammanvägning av nyttan och kostnaderna för olika krav för en tunnel erfordras utveckling av LCC-modeller. För en framgångsrik LCC-analys krävs relevanta grund/indata för de konstruktioner och konstruktionsdelar som förekommer i en tunnel.

På sikt är det nödvändigt att pågående FoU-insatser på LCC-området utvecklas mot en anpassning mot byggnadsverket tunnel, där generella indata analyseras (exempelvis anläggnings-, drifts- och underhållsdata) och modelleras för några vanliga konstruktionselement i tunnlar.

5.1 Bärförmåga - Bergtunnlar

Sannolikhetsbaserad dimensionering:

Dimensioneringsmodeller för bärande konstruktioner av bergtunnlar är idag behäftade med osäkerheter.

För att erhålla kostnadseffektiva lösningar med bibehållen säkerhet vid dimensionering av bergtunnlar är det av största vikt att kunskapsnivån avseende sannolikhetsbaserad dimensionering av bergkonstruktioner höjs. Följande insatser/ frågeställningar bedöms som relevanta och önskvärda att analysera:

- Utveckla och anpassa de sannolikhetsbaserade metoderna till de förutsättningar som gäller för konstruktioner i berg (en sammanhållen teori som på stringent sätt kan beakta de olika typerna av osäkerhet saknas varför ett sådant projekt är centralt)
- Studera bärighetsproblematiken hos en samverkande bergmassa och applicerad förstärkning (bärighetsproblematiken är till sin natur helt central inom frågeställningen sannolikhetsbaserad dimensionering av konstruktioner i berg.)
- Studera vilka acceptanskrav som bör tillämpas vid olika typer av lastfall och konstruktioner i berg.

- Studera användning av observationssystem för konstruktioner i berg (erfarenheterna från användning av observationssystem visar att detta kan vara ett mycket kraftfullt instrument för dimensionering. Det saknas dock en tydlig koppling och förståelse hur det skall infogas i en sannolikhetsbaserad dimensionering).

De idag fastställda Eurocode-dokumenterna behandlar till viss del dimensionering av bergkonstruktioner. Erfarenheter att tillämpa dessa för tunnlar och berganläggningar är, i nuläget, bristfälliga i Sverige.

Det är nödvändigt att för bergkonstruktioner klargöra vilken påverkan den europeiska harmoniseringen får på dimensionering generellt och på sannolikhetsbaserad dimensionering specifikt.

Stålfiberarmerade sprutbetongkonstruktioner:

De beräkningsmodeller för stålfiberarmerad sprutbetong som finns idag är mycket ofullständiga. Eftersom stålfiberarmerad sprutbetong används som förstärkningskonstruktion i merparten av de bergtunnlar som byggs i landet så är det mycket angeläget att dessa beräkningsmodeller tas fram.

För att erhålla kostnadseffektiva lösningar med bibehållen säkerhet vid dimensionering av bergtunnlar är det av största vikt att kunskapsnivån avseende stålfiberarmerad sprutbetongs verkanssätt/ bärförmåga höjs. Följande insatser/ frågeställningar bedöms som relevanta och önskvärda att penetrera:

- Analysera hur skrovligheten, vidhäftningen, olika antagna styvheter hos bergmassan, tvång, lastförutsättningar mm kan påverka förstärkningen.
- Klarlägga vilka egenskaper fiber och betong bör ha för att erhålla önskat resultat i förstärkningen. Hänsyn måste tas till att verknings sättet kan vara olika beroende på om lasten tas upp genom plattverkan, valvverkan, samt om samverkan mellan berg och betong kan antas eller ej etc.
- Utredda om krympning och krypning kan reducera effekten av valvverkan. Det är viktigt att kunna bedöma storleksordningar och i vilken mån valveffekten bör inkluderas i analyserna.
- Bedöma brickans utformning och storlek för att eliminera risken för ett genomstansningsbrott. Ett område där kunskaperna är bristfälliga vad gäller fiberarmerad betong. Detta är viktigt för bedömningen av brickans funktion.
- Småskaliga och fullskaliga försök på bultad fiberarmerad sprutbetong, dels på jämn och ojämn yta. Försök under realistiska förhållanden och vars utformning tas fram som följd av utredningar enligt 1-4.
- Utveckla teoretiska modeller som kan beskriva bärförmågan.

Injekterings förstärkande verkan:

Bergtunnlars krav på täthet medför normalt att systematisk förinjektering utförs med cementbruk. Stora insatser har gjorts för att förstå hur injekteringsbruk penetrerar och tätar sprickor i hårt kristallint berg. Kunskapen om vilken förstärkande verkan som detta har är däremot en frågeställning som inte är helt klarlagd. Med önskad kunskap på detta område finns en möjlighet att med bibehållen säkerhet kunna minska omfattningen och därmed kostnaderna av de kompletterande förstärkningsarbetena.

Bruksgränsdimensionering:

Beständighetskrav för armerade betongkonstruktioner uppfylls till stor del genom att begränsa sprickvidden i långtidslastfallen. Modeller saknas emellertid för att genomföra sprickbreddsberäkningar för betongkonstruktioner som samverkar med omgivande berg eller jord. Det är även i detta fall sannolikt att bättre kunskap skulle kunna leda till att billigare konstruktionslösningar kan användas.

Explosionslaster i bergtunnlar:

För explosionslaster i bergtunnlar är kunskaperna bristfälliga när det gäller dimensionerande last och dimensioneringsmetoder. Kunskap om laststorlekar och dimensioneringsmodeller är bristfällig. Det finns idag inte någon dimensionerings- eller beräkningspraxis avseende explosionslaster i bergtunnlar, nationellt såväl internationellt.

Bergtunnlar utgör ofta ett komplext system med avseende på geometri, bergets egenskaper och olika förstärkningselements funktion och materialegenskaper, vilka man bör ta hänsyn till vid dimensioneringen. Därför kan inte verifiering av bärförmågan i en bergtunnel utföras med hjälp av förenklade analytiska modeller. Datorbaserad numerisk analys bör därför kunna utgöra ett attraktivt verktyg vid sådana analyser eftersom hänsyn kan tas till många faktorer samtidigt, i en och samma beräkning.

För att erhålla kostnadseffektiva lösningar med bibehållen säkerhet vid dimensionering av explosionslaster i bergtunnlar är det av nödvändigt att metodik och verktyg utvecklas så att dynamisk numerisk analys kan utföras med avseende på explosionslaster i bergtunnlar. Följande insatser/ frågeställningar bedöms som relevanta och önskvärda att penetrera:

- Undersöka bärförmågans känslighet med avseende på materialmodell för bergmassan vid applicering av lasten P2 i taket och i pelaren. Härvid rekommenderas en materialmodell som kan ta hänsyn till att hållfastheten reduceras då bergmassan skadas ("strain softening").

- Undersöka bärförmågans känslighet med avseende på analysmetod, d.v.s. analysera effekten av att sprickor simuleras explicit.
- Undersöka bärförmågans känslighet med avseende på bergmassans kvalitet vid applicering av lasten P2 i taket och i pelaren. Undersöka bärförmågans känslighet med avseende på problemgeometri, t.ex. pelartjocklek och bergtäckning.
- Vidareutveckla den oelastiska materialmodellen för sprutbetongen så att den kan representera en avtagande bärförmåga som funktion av vinkeländring och axiell deformation.
- Verifiera modellresultaten genom jämförelser med fältförsök.

Skadezonstabell:

Konsekvensen av skada på det kvarvarande berget har en fundamental betydelse för förstärkningsbehovet av den aktuella konstruktionen, eftersom detta berg normalt samverkar med applicerad förstärkning.

Ny kunskap har påvisat begränsningar i den tabell, som anges i såväl Vägverkets projekteringsanvisningar för Ringen/Yttre Tvärleden som i AnläggningsAMA 98, avseende beräknad skadezon utifrån sprängämnens laddningskoncentration.

Det är av största vikt att Vägverket, som beställare och förvaltare, tillsammans med branschen tar fram en aktuell skadezonstabell baserad på ny kunskap eftersom den sprängningsinducerade skadezonen påverkar både dimensioneringen av bergtunneln, där skadezonen ingår både som last och samverkande förstärkning, och den kommande förvaltningen av tunneln. En tunnel utförd med skonsam sprängning med en begränsad skadezon genererar en mindre underhållsinsats jämfört med en tunnel med en betydande skadezon.

5.2 Bärförmåga – Betonginklädda tunnlar

Modell för analys av last från överliggande bergmaterial:

En av de centrala frågorna avseende dimensionering av betonginklädda tunnlar med avseende på bärlighet, är hur man definierar ovanliggande berglast. För denna typ av konstruktion utgör berget både en last och ett stödjande element. Modeller för analys av last från överliggande bergmaterial finns framtagna baserade på valvbildningsteori samt bergmassans hållfasthetsegenskaper, den första framtagna av Terzaghi 1946, men det kvarstår dock stora frågetecken kring deras relevans för svenska förhållanden.

För att erhålla kostnadseffektiva lösningar vid dimensionering av betonginklädda tunnlar är det av största vikt att kunskapsnivån avseende modellering av överliggande berglast höjs.

Modell för analys av vattentryck vid dränerade förhållanden:

En odränerad tät betonginklädd tunnel dimensioneras för fullt vattentryck som är lätt att definiera. Vid en dränerad konstruktion, exempelvis en tunnel med en öppen sula, är det dimensionerande vattentrycket inte helt enkelt att bestämma. Utanpåliggande dränsystems förmåga att reducera vattentrycket samt risk för igensättning är svårbestämda faktorer som påverkar den faktiska lastverkan.

För att erhålla kostnadseffektiva lösningar vid dimensionering av betonginklädda tunnlar är det av största vikt att befintlig kunskap avseende modellering av vattentryck vid dränerade tunnlar ökas. Vidare måste frågan om en dränerad tunnel skall dimensioneras för en olyckslast med fullt vattentryck ifall dräneringen av någon anledning blir funktionsoduglig, penetreras.

Dimensionering för "extrem blocklast":

En betonginklädnad skall enligt Tunnel 99 dimensioneras för en extrem blocklast av storleken 60 kN, vertikalt verkande inom en yta med basmåtten 1 * 1 meter. Efter särskild utredning kan andra lastvärden väljas samt hänsynstagande till andra tunneldimensioner göras. Vid en extremt konservativ analys kan storleken på bergblocket teoretiskt beräknas utifrån hållfasthetsparametrarna för bergmassan och den kil som (teoretiskt) skulle kunna bildas i taket för det aktuella tunneltvärsnittet. Dessa två ytterligheter med avseende på olyckslast från extrem blocklast, kan vid stora tunneltvärsnitt skilja sig avsevärt åt, vilket tydliggör osäkerheten i precisionen på definitionen av dessa olyckslaster.

För att erhålla kostnadseffektiva lösningar med bibehållen säkerhet är det av största vikt att "rätt nivå" avseende krav på "extrem blocklast" analyseras.

Lokalt verkande is- och/eller tjältryck:

Kunskapen avseende identifikation samt definition av lokalt verkande is-/tjältryck samt tryck från förekommande lerzoner är andra områden där kunskapen inte är fullständig. Detta fenomen som orsakar stora merkostnader i förvaltningsfasen behandlas mer detaljerat i förstudien "Tätning och frostsäkring av tunnlar", där även fortsatta FoU-insatser föreslås.

Inspektionsmöjlighet:

Bärande huvudsystem för en betonginklädd tunnel, där bakomliggande berg är en del av detta skall normalt kunna inspekteras på handnära avstånd. Om inklädnad är motgjuten mot berg anses inspektion av inklädnad ge tillräcklig information om tillstånd hos bakomliggande bärande huvudsystem. En motgjuten betonginklädnad mot berg anses uppfylla dessa krav om den är utförd utan tättslutande membran. Huruvida en tät tunnel med en relativt tjock membran- och geotextillösning uppfyller kraven på inspektionsmöjlighet är i nuläget inte helt klarlagt.

För att erhålla kostnadseffektiva lösningar med bibehållen säkerhet samtidigt som att förvaltningsfasen rationaliseras är det av största vikt att möjligheterna till inspektion av bärande huvudsystem för betonginklädda tunnlar (möjligheter och begränsningar) analyseras i detalj. Erfarenhetsmässigt är det kostnadseffektivt att minimera behovet av särskild uppföljning och kontroll. I de flesta fall leder detta till lägsta totalkostnad eftersom alla exklusiva åtgärder i driftskedet kostar betydande belopp.

”Vattentät betong”:

Inläckning i sprickor är ett problem i alla applikationer där betong används för att hålla vatten på en sida om en konstruktion. Erfarenheter från de tunnlar som nyligen byggts i Sverige visar att vi inte har tillräcklig teknisk nivå inom området ”vattentät betong”, inkluderande gjut- och rörelsefogar för vattentätning.

För att erhålla en kostnadseffektiv vattentät konstruktion där tätheten är säkerställd under tunnelns hela livslängd är det av största vikt att befintliga lösningar på detta område analyseras och förbättras. Denna förbättringspotential är också viktig ur ett miljöperspektiv eftersom dränering av omgivande mark ofta medför negativa miljömässiga effekter.

Dimensionering av betongkonstruktion för explosionslast:

Vid dimensionering av betongkonstruktioner för dynamisk explosionslast hänvisas till VST:s publikation ”Explosionslast vid betongtunnlar”, ANV 0187 för att få råd avseende beräkningsmetod. Denna anvisning bygger på en förenklad modell för beräkning av moment och deformationer med hjälp av energibetraktelser. I dagsläget saknas dock tillräcklig kunskap om metoden för att verifiera rotationskapacitet som används i den förenklade modellen. Vidare saknas en modell för dimensionering med avseende på tvärkraft. Slutligen saknas erfarenhet av dimensionering för utföranden med en ”inte enkel” geometri eller där omgivningsförhållandena är sådana att konsekvenserna vid brott blir stora.

Följande viktiga moment bedöms som relevanta och viktiga att analysera för Vägverket:

- Vilka olycksscenarioer är rimliga att förutsätta
- Vilka dimensionerande laster och andra förutsättningar uppstår i dessa fall
- Hur säkras byggnadsdelarnas och installationssystemens bärförmåga och funktionssäkerhet vid de dimensionerande förhållandena
- Vilka restriktioner eller andra åtgärder behövs för att i driftskedet säkra antagandena om förutsatta olycksscenarioer och möjligheterna till räddningsåtgärder

5.3 Inredning och installationer

Inklädnad:

Konstaterade problem finns med bl.a. utmattning av infästningsbultar. Kunskap om laster orsakade av luftstötar från fordon samt is och tjälning är otillräcklig. Beräkningsmodeller för olyckslaster är bristfälliga speciellt med avseende på brand och påkörning.

Vägkonstruktion:

För dimensionering av tunna vägkonstruktioner på betongplattor i tråg och tunnlar saknas idag tillräcklig kunskap. Ett flertal fall finns med oacceptabel blåsbildning. Det utförande som idag används mest och som bedöms uppfylla ställda krav, är utförande med ett tätande epoxiskikt. Denna teknik har dock negativa arbetsmiljömässiga effekter varför det är nödvändigt att analysera och utvärdera övriga alternativa utföranden som är bättre lämpade ur arbetsmiljösynpunkt.

5.4 Brandskydd

Allmänt bör de utredningsrapporter som tagits fram efter de stora tunnelbränderna vid Mt Blanc, Tauern och Godthard analyseras. Godthardtunneln är på grund av sin utformning med separat utrymningstunnel speciellt intressant.

Branddimensionering/ brandlaster:

Det råder fortfarande stor osäkerhet kring vilka brandlaster som skall användas vid dimensionering av tunnlar. Det finns ett antal standardiserade brandkurvor som används men man ska vara medveten

om att den mest tillämpade brandkurvan, ISO 834 är framtagen för att efterlikna en brand i ett rum. Tunnelutrymmet skiljer sig från rumskonfigurationen och mängden brännbart material i tunnlar (framförallt fordon och deras last) är större än i ett rum vilket gör att andra brandlaster än standardbrandkurvan behövs som ett komplement.

För att säkerställa att en vägtunnel uppfyller krav avseende brandsäkerhet att kunna uppskatta brandbelastningen i en tunnel krävs mer kunskap om vilka scenarier som bör studeras, om en förväntad brands storlek samt om hur brand kan spridas mellan fordon i en brandsituation. Det konventionella sättet att använda tid-temperaturkurvor för att beskriva påverkan på konstruktionen kan behöva kompletteras med andra parametrar, exempelvis strålning.

I internationell samverkan bör det skapas en databas över bränder och brandincidenter i vägtunnlar.

Branddimensionering/ avspjälkning av betong vid brand:

Spjälkning av betong vid brand är ett område där ytterligare kunskap behövs, framförallt grundläggande forskning så att man kan förstå mekanismerna bakom fenomenet spjälkning. Det är först då som man kan beskriva spjälkningen på ett tillfredsställande sätt som man kan inkludera spjälkning i brandberäkningsmodeller.

Vid dimensionering av nya tunnlar är det viktigt att effekterna avseende avspjälkningen vid brand kan lösas, alternativt minimeras till en acceptabel nivå. Forskning bakom metoden att blanda fibrer av polypropylen i betongen (med reducerande/elimineringseffekt avseendespjälkning) är ännu i ett tidigt stadium men det finns tillräckligt med underlag för att kunna använda polypropylenfibrer i betong utsatt för brand. En annan metod som kan förhindra alternativt minimera effekterna av brandspjälkning, är termisk isolering. Man bör göra en utvärdering av dessa metoder för att kunna tillämpa dem, i syfte att säkerställa att krav avseende brandsäkerhet kan uppfyllas.

Branddimensionering enligt Eurocodes:

Inom det europeiska standardiseringsarbetet pågår ett arbete som allmänt behandlar branddimensionering för betongkonstruktioner. Dock avhandlas inte betongkonstruktioner i tunnlar specifikt.

Provberäkning bör göras samt förslag tas fram om vilka kompletterande krav som behövs.

Materialval:

Det är viktigt att de material som används i en tunnel inte bidrar till uppkomst av brand, brandspridning eller rökspridning, allt i syfte att säkerställa att krav avseende brandsäkerhet kan uppfyllas.

Kravspecifikationerna på ingående delmaterial behöver förbättras och differentieras mer samt att verifieringsmetoder identifieras, exempelvis rekommendationer avseende vilka provningar som ska utföras och vilken kravnivå som bör väljas. Inom detta område är det viktigt att de standardiserade brandprovningssmetoder som finns används för att få en gemensam syn framförallt inom Europa. Detta arbete bör bedrivas i standardiseringsgrupper och genom internationellt samarbete tillsammans med egna smärre FoU-insatser.

Provningsmetoder som är lämpliga för att verifiera olika konstruktioners brandegenskaper bör tas fram. Inklädnader med PE-skum som är skyddad med sprutbetong är ett exempel på en konstruktion som bör kunna verifieras med en standardiserad provningsmetod. Möjligheten att driva samarbetsprojekt med andra länder, exempelvis Norge, bör noga studeras.

Brandskydd/ branddetektion:

Att ha ett tillförlitligt detekteringssystem som reagerar snabbt är viktigt för att kunna starta evakuering och brandbekämpning snabbt. En brand i tunnel detekteras oftast genom värmekännade detektorer. Nackdelen med denna typ av detektorer är att de är relativt långsamma. Det finns automatiska system för brandövervakning med TV-övervakning men denna typ av produkt är inte färdigutvecklade än. Dock ska noteras att detta område är mer av karaktären produktutveckling och således inte prioriterat för att stödjas av Vägverket. Ökad kunskap behövs om hur dagens detekteringssystem fungerar i tunnlar för att kunna förbättra vår kravspecifikation för dessa system.

Brandskydd/ brandbekämpning:

Att säkerställa brandskydd så att en eventuell brand inte tillåts spridas okontrollerat och leda till onödigt stora konsekvenser för användare och förvaltare av tunnlar är av största vikt.

Då det gäller räddningstjänstens insats (speciellt ledning och styrning) vid en tunnelbrand så är man medveten om att en sådan insats till stora delar avviker från en insats vid en brand i en byggnad, men några studier för detta finns inte rapporterade, vilket gör att detta område behöver studeras vidare.

Räddningsverket har genomfört ett projekt för att få ytterligare kunskap kring räddningstjänstens insatssituation i tunnlar och undermarksanläggningar. Rapporten "Räddningsinsatser vid tunnelbränder" beskriver en tänkt olycka i en spårtunnel. Olyckan beskrivs utifrån tre perspektiv; brandförloppet, utrymningsförloppet och räddningsinsatsen. Resultaten måste studeras för utvärdering och eventuell ändring av kraven i Tunnel 99.

Brandskydd/ aktivt brandskydd:

Sprinkler i vägtunnlar är ett sätt att skapa ett aktivt brandskydd. Det råder dock mycket delade meningar om sprinkler är ett effektivt sätt för att stoppa eller begränsa en tunnelbrand. Motståndarna hävdar att sprinkler inte kan nå det brinnande materialet i ett fordon medan de som förespråkar sprinkler hävdar att huvudsyftet med sprinkler är att förhindra brandspridning mellan fordon. Kunskapen inom området sprinkler i vägtunnlar bör utökas med fokus på att studera metoder som leder till effektiv utformning och verkanssätt av sprinklersystem vid tunnelbränder.

Brandskydd/ brandgasventilation - brandgaskontroll:

Det är ett grundkrav att ventilationssystemen utformas så att de inte ökar brandeffekter eller förvärra situationen för utrymmande personer via rökgasspridning eller okontrollerad spridning.

Vid en tunnelbrand utvecklas rökgaser, som begränsar siktmöjligheter för personer i tunnlar och som dessutom är giftiga.

I nuläget saknas tillräcklig kunskap om grundprinciper för utformning av ventilationssystem för brandgaskontroll och kunskap kring styrning och aktivering av brandgaskontrollsystem vid räddningsinsats i tunnlar, vilket måste åtgärdas.

Brandskydd/ Utrymning:

Att säkerställa fungerande utrymning av tunnlar och därmed förhindra onödigt stora konsekvenser är ett grundkrav.

Utrymning av vägtunnlar i händelse av en brand kan delas upp i flera olika moment. Det första är att trafikanter ska bli varse att det brinner i tunneln och att de behöver tid att reagera. Sedan tar det en viss tid att utrymma fordon och ta sig till utrymningsvägar. Slutligen måste man ta hänsyn till den tid som det tar för personer som utrymmer att ta sig till säker plats genom utrymningsvägar. Det finns stora brister i kunskapen om hur lång tid de olika delmomenten i en utrymning tar och därför är det svårt att optimalt utforma utrymningsvägar i en tunnel. Speciellt nämns kunskapsbristen avseende utrymningstid för att utrymma en buss.

Personer som blir inblandade i en olycka med brand ska ha möjlighet att på egen hand kunna utrymma till en säker plats. Kunskapen om de särskilda behov som funktionshindrade personer och barn har behöver i hög grad förbättras. Utrymningsvägar måste vara rökfria. Bättre kunskap behövs om vilka lösningar som kan säkerställa detta krav.

För att, i högre grad än idag, säkerställa kostnadseffektiva lösningar med krav på brandskydd uppfyllda bör alla frågor ovan penetreras.

5.5 Miljö och hälsa

Under de senare åren har Vägverket deltagit i flera samverkansprojekt för att klarlägga hälsoeffekterna av luftföroreningar i tunnlar. Kvävedioxid har bedömts vara av primärt intresse och det kan även betraktas som indikatorsubstans för andra skadliga ämnen i fordonsavgaserna.

När det gäller luftkvaliteten i tunneln anges finns i Tunnel 99 ännu inga kravvärden på luftföroreningsnivåer med avseende på kvävedioxid. Under våren 2002 kommer ett kriteriadokument för kvävedioxid att färdigställas. Efter en kompletterande konsekvensutredning förväntas målvärden kunna fastställas. Behov finns av kriteriadokument även för andra luftföroreningar. I första hand bedöms små partiklar med diameter under 2,5µm (PM_{2,5}) vara intressanta att studera.

5.6 Utformning och säkerhet

Nyttjandet av en tunnel skall vara säkert. Detta innebär att de risker som kan uppstå skall kunna hanteras systematiskt så att oönskade händelser inte inträffar. Om det trots detta inträffar en större olycka skall händelseförloppet kunna styras så att konsekvenserna minimeras. Områden där kunskaper om hela dimensioneringskedjan bör fördjupas är

- dimensionering av trafikutrymmet och speciellt kravdifferentiering med avseende på trafikmängd
- riskhanteringsmodell generellt
- dimensioneringsmodell för behov av säkerhetsutrustning
- riskerna vid utsläpp av giftiga ämnen i samband med olycka
- utrymningsdimensionering.

För att kunna genomföra en tillräckligt bra dimensionering krävs dessutom fördjupad kunskap om

- förutsättningarna vid kritiska scenarier
- människors beteende vid olyckor och vid utrymning
- räddningstjänstens behov av utrymmen och fast utrustning för att kunna göra insatser vid kritiska scenarier.

5.7 Buller och vibrationer

Under byggskedet kan problem uppstå i form av buller eller vibrationer och detta kan vara störande för de som bor eller uppehåller sig i närheten. För att minska trafikantkostnader och minimera den totala byggtiden och därmed totalkostnaden för projektet, är det önskvärt att byggnadsarbetet kan bedrivas dygnet runt. Eftersom buller och vibrationer upplevs

mycket mer störande under nattvilan är dessa önskemål svåra att uppfylla. En förutsättning är då att precisa och pålitliga modeller för att prognostisera uppkomna nivåer för buller och vibrationer (speciellt avseende stomljud vid borring) finns för projektering av anläggningen och för planering av byggandet. De modeller som används idag har konstaterade brister varför vidareutveckling av befintliga modeller är önskvärd.

De byggmetoder som idag används är effektiva och väl utvecklade för att få en snabb framdrift. Som en följd av detta ger de ofta större och tyngre maskinerna även högre buller och vibrationsnivåer. Tydligare krav bör tas fram av myndigheter och byggherrar så att tillverkare och entreprenörer även kan ta in dessa krav i utvecklingen av maskinparken.

5.8 Energihushållning

I en tunnelanläggning förbrukas relativt mycket energi för belysning, ventilation, pumpar och övriga installationer. För att säkerställa en kostnadseffektiv förvaltning så erfordras en systematik/handbok som stöd vid projektering av installationerna så att energiförbrukningen kan vägas in i totalbedömningen. Ett exempel är att erforderliga ljusnivåer kan minskas om ljusraster byggs vid tunnelmynningarna men portalens arkitektur och färgsättning har även betydelse. Insatser för att ta fram erforderlig kunskap samt att sammanställa denna systematik/handbok är därför önskvärd .

5.9 Tillgänglighet

För att de funktionshindrade ska kunna använda vägtunnlarna krävs att deras speciella behov analyseras och förs in i regelverken.

Vid en eventuell olycka ska de inblandade kunna rädda sig själva bort från olycksplatsen och till en säker plats. Utrymningsvägar ska därför anpassas till de funktionshindrades behov. Inom detta område har det gjorts en del men ytterligare kan göras.

6 Referenser

Alemo, Holmgren och Skarendahl "Stålfiberbetong för bergförstärkning - provning och värdering", Cement- och betonginstitutet (CBI), ISRN CBI/R - 97/3- SE CBI rapport 3:97, 1997.

Ahlenius, "Explosionslaster och infrastrukturkonstruktioner – Risker, värderingar och kostnader", KTH, ISRN KTH/BKN/B--47—SE, 1999.

Banverket, "LCC-analys för järnvägstunnlar, en förstudie", 1999-10-15.

Banverket, "Scandinavian and Continental Tunnelling Practice, A comparison of Solutions for Waterproofing" Steiner, Malmtorp och Rosengren, Banverket Technical Report BB 00:01, 2000.

Barton, Buen och Roald, "Strengthening the case for grouting", Tunnels & Tunnelling International, VOL 33 NO 12 2001 och VOL 34 NO 1 2002.

Björk, Bärande konstruktioner och laster; En handbok i anslutning till Boverkets konstruktionsregler, 1996.

Boverket, "Boverkets byggregler BBR", BFS 1993:57 med ändringar t.o.m. BFS 1998:38, 1999.

Boverket, "Boverkets konstruktionsregler BKR", BFS 1993:58 med ändringar t.o.m. BFS 1998:39, 1999.

BRANDFORSK, "Brand och brandskydd i undermarksanläggningar", Litteraturstudie, Ingason, Bengtsson och Hiort, projekt 401-971, SP rapport 1997:41, 1998

Det Norske Veritas AB, "Personsäkerhet i tunnlar", Förstudierapport, rapport nr.13614088-1, 1999.

EUREKA, "Fires in Transport Tunnels: Report on full-scale tests", EUREKA-Project EU499; Firetun, Studiengesellschaft Stahlanwendung eIV. D-40213 Dusseldorf, 1995.

Eurocode 1: "Actions on structures – Part 1.2: General actions – Actions on structures exposed to fire" (prEN 1991-1-2, senaste utkast från jan-2001, tidigare ENV 1991-2-2 med NAD).

Eurocode 2: "Design of concrete structures – Part 1.2: General rules – Structural fire design" (prEN 1992-1-2, senaste utkast från dec 2001),

FN, "Recommendations of the group of experts on safety in road tunnels. Final report", 2001, <http://www.unece.org/trans/main/itc/ac7/ac7-rep09e.pdf>

Förordningen om tekniska egenskapskrav hos byggnadsverk, (SFS 1994:1215).

Khoury G. A. och Dr. Anderberg Y. "Concrete spalling review" , FSD: Fire safety design, 2000)

- Korrosionsinstitutet, "Undersökning av tunnelmiljöns korrosiva egenskaper – Etapp 2", Reg.nr: 55 258, 2001.
- Lag om tekniska egenskapskrav på byggnadsverk m.m (SFS 1994:847)
- Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program, Massachusetts Highway Department and Federal Highway Administration, November 1995
- National fire protection association NFPA 502, "Standard for road tunnels, bridges and other limited access highways", 1998.
- Nelson, "Dimensionering av berganläggningar – en inledande studie" Licentiatrapport, KTH, 1400-1292, 2000.
- Nilsson, "Load bearing capacity of steel fibre reinforced shotcrete linings", Licentiatrapport, KTH, 1103-4270, 2000.
- Ouchterlony och Olsson, "Dags att komplettera befintlig skadezonstabell", Bergsprängningskommitténs diskussionsmöte BK2000, 2000.
- PIARC, C5/WG6, PIARC draft proposal on the design criteria for resistance to fire for road tunnel structures, 2000.
- Räddningsverket (SRV), "Räddningsinsatser vid tunnelbränder", PUB P21-391/01, 2001.
- SAFESTAR, Safety standards for road design and redesign, Transport RTD Programme
(http://europa.eu.int/comm/energy_transport/library/additional.pdf)
- Statens Vegvesen, Vann- og frostsikring i tunneler, Retningslinjer 163, 1995.
- Statens Vegvesen, Vegtunneler, Håndbok 021, höringsutgåva 000501, 2000.
- SveBeFo, "Bärförmåga hos fiberarmerad sprutbetong. Laboratorieförsök på cirkulära plattor" Ulf Nilsson, KTH, SveBeFo-rapport 52, 2000.
- Svensk Byggtjänst, "AnläggningsAMA 98. Allmän material- och arbetsbeskrivning för anläggningsarbeten, ISBN 91-7332-885-5, 1999.
- Swedenborg, "Rock mechanical effects of cement grouting in hard rock". Doktorsavhandling CTH, 91-7291-049-60346-718X, 2001.
- Vägverket, "Skonsam sprängning, försiktig sprängning samt bergrensning, bergtekniska anvisningar för projektering av Ringen & Yttre Tvärleden", Projekteringsanvisning ANV 0003:1 Rev. 1. Vägverket Region Stockholm, 1995-09-15.
- Vägverket, "Explosionslaster vid betongtunnlar, Anvisningar för av Ringen & Yttre Tvärleden", ANV 0187. Vägverket Region Stockholm, 1997-06-25.
- Vägverket, "Vägverkets inriktningsprogram för FoU åren 2000-2009", Publ. 1999:72, 1999.

Vägverket, "Tunnel 99", publikation 1999:138, 1999.

Vägverket, "Miljöanpassade tunnlar", Förstudierapport, Avdelningen för Bro och Tunnel, Borlänge, 1999.

Vägverket, "LCC-modeller (bro)", Förstudierapport, Avdelningen för bro och tunnel, Borlänge 1999.

Vägverket, "Optimala standarder (bro)", Förstudierapport, Avdelningen för bro och tunnel, Borlänge 1999.

Vägverket, "Policy för handikappfrågor", 1998:3, beslutsdatum 2000-09-18.

Vägverket, "Plan för Forskning och Utveckling 2000-2002", publikation 2000:9, 2000.

Vägverket, "Hälsoeffekter av trafikavgaser", Jugnelius och Svartengren, Vägverket publikation 2000:64, 2000.

Vägverket, "Tätning av bergtunnlar – förutsättningar, bedömningsgrunder och strategi vid planering och utformning av tätningsinsatser", , publikation 2000:101, 2000.

Vägverket, "Numerisk analys av explosionslaster i bergtunnlar", Rosengren och Brandshaug, Avdelningen för Bro och Tunnel, 2001.

Vägverket, "Tätning och frostsäkring av tunnlar", Förstudierapport, Avdelningen för Bro och Tunnel, 2002.