

Brandpåverkan på betongkonstruktioner

Tunnlar

Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och Vattenbyggnad

HELENA LOND

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för Konstruktionsteknik
Betongbyggnad
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2005
Examensarbete 2005:93

EXAMENSARBETE 2005:93

Brandpåverkan på betongkonstruktioner

Tunnlar

Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och Vattenbyggnad

HELENA LOND

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för Konstruktionsteknik
Betongbyggnad
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, 2005

Brandpåverkan på betongkonstruktioner
Tunnlar
Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och Vattenbyggnad
HELENA LOND

© HELENA LOND, 2005

Examensarbete 2005:93
Institutionen för bygg och miljöteknik
Avdelningen för Konstruktionsteknik
Betongbyggnad
Chalmers tekniska högskola
412 96 Göteborg
Telefon: 031-772 10 00

Omslag:

Översta raden: Bilder från branden i St Gotthardt-tunneln, se kapitel 2.1

Mellersta raden: Den kommande infarten till Götatunneln, se kapitel 3.1

Nedersta raden: Bild 1: De tid-temperaturkurvor som använts i beräkningarna, se kapitel 4.1.1

Bild 2: Temperaturfördelning i taket i Götatunneln, se kapitel 4.2

Bild 3: Böjarmeringsbehovet, se kapitel 6.5

Chalmers Reproservice
Göteborg 2005

Effect of Fire on Concrete Structures
Tunnels
Master's Thesis Structural Engineering
HELENA LOND
Department of Civil and Environmental Engineering
Division of Structural Engineering and Mechanics
Concrete Structures
Chalmers University of Technology

ABSTRACT

Due to the accidents in tunnels in Europe, the safety in tunnels has got more attention. In Sweden there are now a several tunnels under construction, where different designing methods have been used. In this study the effects of some different methods have been studied for a project in Gothenburg, Götatunneln. At some of the tunnel-accidents very high temperatures and power reached and therefore the effects of these have been studied. From the temperature calculations the reinforcement-need due to bending and shear was calculated.

At the tunnel-accidents very big damage due to explosive spalling has occurred and the strength has therefore decreased. This has not caused any problems with the strength so far because the tunnels are situated in steady rock with the ceiling covered with concrete. Therefore the study is concentrated to pure concrete tunnels and how they will be affected if a large fire would occur.

The fire-loads that are used today are based on standardized time-temperature-curves which simulate the fire. The most common are the ISO-curve, HC-curve and the RWS-curve.

Calculations of the temperature have been done for the ceiling of Götatunneln. Six different cases were studied, three different time-temperature-curves with or without fire-insulation. The results from the temperature-calculation were used to reduce the cross-section depending on the temperature. The higher temperature, the worse strength. The reduced cross-section has been used to calculate the reinforcement due to both bending and shear.

From the results of bending it is obvious that most of the tunnels are designed with too small fire-loads today. In this case the serviceability state is decisive. Probably will the tunnel resist a fire without fire-insulation, but due to the safety and the very high reparation-costs that spalling cause is it recommended to always add fire-insulation. For the shear is it a little bit more complicated. The whole shear-reinforcement loses its capacity because the reinforcement is placed in one usable layer. The bending-reinforcement is placed in three different layers and if the first layer loses its capacity the other two can compensate the lost capacity.

Keywords: Fire, tunnels, effect of fire, concrete structures, fire load, strength

Brandpåverkan på betongkonstruktioner

Tunnlar

Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och Vattenbyggnad

HELENA LOND

Institutionen för bygg- och miljöteknik

Avdelningen för Konstruktionsteknik

Betongbyggnad

Chalmers Tekniska Högskola

SAMMANFATTNING

Då det på senare tid har inträffat ett antal större tunnelolyckor runtom i Europa har säkerheten uppmärksammats mer och mer. Då det även sker flera tunnelbyggen i Sverige där olika dimensioneringsmetoder använts har effekterna av lite olika metoder studerats för ett i tiden aktuellt projekt, nämligen Götatunneln. Vid flera av olyckorna har väldigt höga effekter och temperaturer uppmätts därför har olika brandlaster studerats och effekterna av dessa har beräknats. Med hjälp av temperaturfördelningen har sedan en dimensionering map moment gjorts samt tvärkraftsarmeringsbehovet beräknats.

Vid de olyckorna som skett har stora spjälkningsskador uppkommit och bärförmågan reduceras därav. I de tunnlar som olyckorna har skett i hittills har det ändå inte varit några större problem med bärförmågan då det varit bergstunnlar klädda med betong. En av begränsningarna har därför gjorts till rena betongtunnlar, hur kommer de påverkas om en större brand skulle inträffa?

De brandlaster som finns i normerna idag är standardiserade tid-temperaturkurvor som simulerar brandförloppet genom brandgastemperaturen. De som används flitigast är ISO-kurvan, HC-kurvan och RWS-kurvan. Temperaturberäkningar har gjorts för taket i Götatunneln (av den del som består av betongtunnel). Totalt studerades sex olika lastfall, tre olika tid-temperaturkurvor med och utan brandisolering. Resultaten från temperaturberäkningarna har sedan applicerats på tvärsnittet som reducerats beroende på hur hög temperaturen är. Ju högre temperatur, desto sämre bärförmåga. Det reducerade tvärsnittet har sedan använts för att beräkna den mängd armering som krävs för det böjande momentet samt tvärkraften.

Med resultaten i hand för böjarmeringen så dimensioneras de flesta tunnlar idag med för låga brandlaster, men i fallet Götatunneln är kraven för uppsprickning i bruksgränstillståndet lika höga som för brand. Troligtvis skulle tunneln klara en brand utan isolering, men av säkerhetsskäl samt med hänsyn till de stora reparationskostnader som inträffar efter en brand så rekommenderas ändå att alltid brandisolera. För tvärkraften blir det lite mer komplicerat då hela byglarna förlorar sin kapacitet genom att den del närmast brandbelastningen utsätts för så höga temperaturer.

Nyckelord: Brand, tunnlar, brandpåverkan, betongkonstruktioner, brandlaster, bärförmåga, tid-temperaturkurvor

Innehåll

ABSTRACT	I
SAMMANFATTNING	II
INNEHÅLL	IV
FÖRORD	VII
BETECKNINGAR	VIII
1 INLEDNING	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	1
1.3 Begränsningar	1
1.4 Metod	2
2 BRANDPÅVERKAN	3
2.1 Erfarenhet från tidigare olyckor	3
2.2 Brandlaster	5
2.2.1 ISO-kurvan	6
2.2.2 HC-kurvan	6
2.2.3 RABT-kurvan	6
2.2.4 RWS-kurvan	7
2.2.5 Andra tid-temperaturkurvor	7
2.2.6 Avsvalning	8
2.3 Betongkonstruktioners beteende vid brandpåverkan	8
2.3.1 Betongens beteende	8
2.3.2 Armeringens beteende	8
2.3.3 Armerade betongkonstruktioner	8
2.4 Dimensionering av brandbelastade betongtunnlar	10
3 GÖTATUNNELN - EN FALLSTUDIE	11
3.1 Götatunneln	11
3.2 Metodik och omfattning	12
3.3 Datorprogram	14
3.3.1 SOLVIA	14
3.3.2 MatLab	14
3.3.3 Strip-Step	14
4 TEMPERATURBERÄKNINGAR	15
4.1 Förutsättningar	15
4.1.1 Tid-temperaturkurvor	15
4.1.2 Geometri	15

4.1.3	Materialegenskaper	16
4.2	Resultat	17
4.2.1	Lastfall 1	18
4.2.2	Lastfall 2	19
4.2.3	Lastfall 3	19
4.2.4	Lastfall 4	20
4.2.5	Lastfall 5	20
4.2.6	Lastfall 6	21
4.2.7	Uppvärmning	21
4.2.8	Avsvalning	22
4.2.9	Sammanfattning av resultat	24
5	DIMENSIONERINGSFÖRUTSÄTTNINGAR	25
5.1	Materialegenskaper	25
5.2	Förenklingar av materialegenskaper	26
5.2.1	Stål (armeringen)	26
5.2.2	Betong	28
5.3	Förenklingar av geometrin	29
6	DIMENSIONERING MED AVSEENDE PÅ MOMENT	32
6.1	Preliminär dimensionering	32
6.2	Dimensionering	32
6.3	Förankring och avkortning	33
6.4	Förskjutning av kurvor pga sneda sprickor	34
6.5	Resultat	34
7	FRAMTAGNING AV TVÄRKRAFTSARMERINGSBEHOV	38
7.1	Förutsättningar	38
7.1.1	Förenklingar	38
7.2	Beräkningsgång	38
7.2.1	Betongens tvärkraftskapacitet	38
7.2.2	Inverkan av normalkraft	39
7.3	Resultat	39
8	DISKUSSION OCH SLUTSATSER	42
9	REFERENSER	46

Förord

Jaha, då sitter man här lite mer än ett år senare. Examensarbetet är snart klart och har dragit ut en hel del på tiden. Mycket har hänt under detta året och den största anledningen till fördröjningen är att jag jobbat heltid i mer än 12 månader.

Examensarbetet har gjorts på Reinertsen i samarbete med institutionen för konstruktion och mekanik, betongbyggnad, Chalmers tekniska högskola. Mina handledare har varit Jonas Magnusson i första hand, samt även Morgan Johansson på Reinertsen. Examinator på institutionen har varit Kent Gylltoft. Dessa herrar ska ha ett stort tack, för utan dessa hade examensarbetet inte kunnat genomföras. Det projekt som jag studerat närmare är Götatunneln, hur kommer den att påverkas om en brand skulle inträffa.

Skulle även vilja passa på att tacka alla anställda på Reinertsen som hjälpt mig då jag stött på problem samt för sällskapet på fikaraster och luncher. Henrik Karlsson på institutionen för byggnadsteknologi, byggnadsfysik ska även han ha ett stort tack för all hjälp med byggfysikaliska termer och framtagning av indata. Min opponent Rikard Eriksson skulle jag också vilja tacka för sitt tålamod och värdefulla kommentarer. En annan person som jag skulle vilja tacka är Frank Schatter som lotsat mig bland de tyskspråkiga hemsidorna om tunnelolyckor och standarder, samt alla nära och kära som stöttat mig då det varit tufft att hinna med både examensarbete och ett heltidsjobb.

Göteborg juli 2005

Helena Lond

Beteckningar

Latinska versaler

A_{s0}	minsta böjarmeringsarea i dragen zon inom betraktad konstruktionsdel
A_{s1}	nedersta (första) lagrets armeringsarea
A_{s2}	andra lagrets armeringsarea
A_{s3}	tredje lagrets armeringsarea
E_c	Elasticitetsmodul för betong
E_{ck}	karakteristisk E-modul för betong
E_d	dimensionerande E-modul
E_k	karakteristisk E-modul
E_s	E-modulen för stålet
E_{sk}	karakteristisk E-modul för stål
M_d	dimensionerande yttre moment
N_d	dimensionerande yttre normalkraft
T	temperatur
V_c	betongens tvärkraftskapacitet
V_i	inverkan av variabel effektiv höjd
V_{pt}	avdrag på V_c -termen pga dragande normalkraft
V_s	tvärkraftsarmeringens kapacitet
V_{sd}	tvärkraft av dimensioneringslast

Latinska gemena

b_w	balklivets minsta bredd inom effektiva höjden i aktuellt tvärsnitt
c	minsta avståndet av avstånden mellan armeringsjärn och armeringsjärn/underkant/ytterkant
d	effektiv höjd
d_1	avstånd från ök till det nedersta armeringslagret
d_2	avstånd från ök till det andra armeringslagret
d_3	avstånd från ök till det tredje armeringslagret
f_b	vidhäftningshållfasthet
f_{st}	stålets draghållfasthet
f_{st1}	nedersta (första) armeringslagrets draghållfasthet
f_{st2}	andra armeringslagrets draghållfasthet
f_{st3}	tredje armeringslagrets draghållfasthet
f_{sv}	tvärkraftsarmeringens utnyttjningsbara hållfasthet
f_v	betongens formella skjuvhållfasthet

h	tvärsnittshöjd
h_{red}	reducerad tvärsnittshöjd
h_{red1}	reducerad tvärsnittshöjd pga lastfall 1
h_{red2}	reducerad tvärsnittshöjd pga lastfall 2
h_{red3}	reducerad tvärsnittshöjd pga lastfall 3
l_b	förankringslängd
t	tid i minuter
x	koordinat längs höjden av tvärsnittet
x_1	avstånd från u_k till nedersta (första) armeringslagret
x_2	avstånd från u_k till andra armeringslagret
x_3	avstånd från u_k till tredje armeringslagret
z	inre hävarm samt koordinat längs tunnelsektionen

Grekiska versaler och gemener

α, β	tryckblocksfaktorer
ε_{s3}	stältöjning för det tredje armeringslagret
ε_{cu}	betongens brottstukning vid tryckt kant för böjning
ϕ	armeringsstångens diameter
η	vidhäftningsfaktor och faktor som beaktar systematiska skillnader mellan provad materialegenskap och materialegenskap hos verklig konstruktion
η_1	reduktionsfaktor med hänsyn till undergjutning
ξ	faktor som beaktar inverkan av effektiv höjd
ρ	armeringsinnehåll
σ_s	stålspänning
γ_m	partialkoefficient för värde på materialegenskap
γ_n	partialkoefficient för säkerhetsklass

1 Inledning

Bränder i tunnlar har blivit allt mer uppmärksammat på senare tid. Detta bland annat för att det byggs fler och fler tunnlar samt att det även tyvärr har skett ett antal större brandkatastrofer under de senaste åren. Eurotunneln 1996, Mont Blanc-tunneln 1999 och S:t Gotthardt-tunneln 2001 [1] är några exempel på större tunnelkatastrofer. Bara här i Sverige har tre stora projekt startats, Södra Länken i Stockholm (som är klar), Götatunneln i Göteborg och Citytunneln i Malmö. Dessa tre tunnelprojekt har olika dimensioneringsförutsättningar och därför dimensionerats på olika sätt.

1.1 Bakgrund

Idag finns det få regler för dimensionering, vilka brandlaster som bör väljas samt vilket brandskydd som är mest lämpat för tunnlar. Både Vägverket och Banverket har utarbetat anvisningar, TUNNEL 99 och BV TUNNEL, vid branddimensionering. Trots detta kvarstår det frågor om hur man på bästa sätt dimensionerar en betongtunnel med avseende på brand. Dessutom är de beräkningsverktyg som en konstruktör har tillgång till inte anpassade för branddimensionering.

Då Reinertsen, som detta examensarbete har gjorts i samarbete med, dimensionerat en bit av Götatunneln i Göteborg har detta projekt studerats och analyserats lite mer ingående. Götatunneln är del av Götaleden som sträcker sig längs södra älvstranden i Göteborg. Själva tunneln är 1,6 km och består av ca 1000 m bergstunnel, två betongtunnelrör á 210 m vid Lilla Bommen, som konstrueras av Reinertsen, samt två betongtunnelrör á 360 m vid Järntorget.

1.2 Syfte

Syftet med detta examensarbete är att i ett fall, Götatunneln, studera skillnaderna mellan olika brandlaster och se vad det får för konsekvenser för dimensioneringen med de beräkningsverktyg som en konstruktör har tillgång till i sitt dagliga arbete. För att få lite mer förståelse vilka brandlaster som finns och vad normerna säger samt vilka konsekvenser som uppstått vid olyckorna har även en litteraturstudie gjorts med avseende på dessa.

1.3 Begränsningar

Idag finns det tämligen väl utarbetade praxis för branddimensionering av byggnader, varför begränsningar har gjorts till tunnlar. De dimensioneringsmetoder som används idag är i stort sett desamma för tunnlar som för byggnader. Detta är dock inte så bra i och med att bränder i tunnlar har ett annat förlopp än bränder i byggnader, då det uppnås mycket högre temperaturer vid en brand i en tunnel.

I de brandkatastrofer som inträffat hittills har det inte varit några större problem med bärförmågan. Detta tack vare att det har varit bergstunnlar klädda med betong. Begränsningar har därför även gjorts till betongtunnlar.

En annan begränsning som gjorts är de beräkningsverktyg som använts. Idag finns det beräkningsverktyg som simulerar en brand, men dessa brukar inte finnas på "normala" kontor och används inte i så stor utsträckning av konstruktörer. Då dessa program som en konstruktör använder sig av inte är anpassade efter branddimensionering så användes även MatLab som beräkningsverktyg för att få olika bärförmåga i olika delar av tvärsnittet.

1.4 Metod

Arbetet inleds med en litteraturstudie där några tunnelolyckor, olika brandlaster samt hur betongkonstruktioner påverkas av en brand studeras närmare. En fördjupning görs med hjälp av temperaturberäkningar och dimensionering för Götatunneln.

I temperaturberäkningarna väljs tre tid-temperaturkurvor ut med hänsyn till de olika brandförloppen. Totalt blir det sex olika lastfall, varje tid-temperaturkurva med och utan brandisolering. Dessa fall har sedan analyserats med hjälp av beräkningsprogrammet SOLVIA för att få temperaturfördelningen i ett tunneltvärsnitt. Endast brandlasten modelleras i SOLVIA. Resterande snittkrafter, från till exempel jordlast och egentyngd kommer från de systemanalyser som redan gjorts av Reinertsen i projektet för Götatunneln.

Vid dimensioneringen av det utvalda tvärsnittet görs den reducering av tvärsnittet med hänsyn till temperaturfördelningen för de olika lastfallen. Efter att tvärsnittet reduceras används MatLab för att dimensionera tvärsnittet med avseende på både moment och tvärkraft.

2 Brandpåverkan

De branddimensioneringsmetoder som används idag har börjat ifrågasättas sedan det skett ett antal större tunnelbränder i Europa. Dessa bränder har fått ödesdiga konsekvenser, både ekonomiskt och i antalet dödsoffer och skadade. Nedan beskrivs dessa bränder mer ingående, vad som var orsaken och vad som blev utgången. För att undvika liknande katastrofer finns det idag olika brandlaster som används för att dimensionera tunnlar. Bakgrunden till dessa brandlaster kommer också att behandlas i detta kapitel. Vidare behandlas hur bränder påverkar armerade betongkonstruktioners bärförmåga. Vilka beräkningsmodeller och dimensioneringstillvägagångssätt som används kommer också att beskrivas.

2.1 Erfarenhet från tidigare olyckor

Idag finns det totalt 14 fordonstunnlar i världen som är över 8 km långa, av dessa är lite drygt hälften av enkelrörstyp. Trafiksäkerheten är betydligt lägre i dessa än i dubbelrörstunnlar, där det är två separata tunnelrör med enkelriktad trafik. Vidare är det betydligt svårare att sätta sig i säkerhet i enkelrörstunnlar, då utrymning sker i samma tunnelrör som branden är i. Enligt [2] så startar tunnelkatastrofer oftast med en frontalkrock mellan två fordon, vilket kan undvikas i dubbelrörstunnlar. I några av de olyckor som visas i *Tabell 1* förorsakades många dödsoffer i första hand av den våldsamma utvecklingen och spridningen av giftiga rökgaser. Människors irrationella beteende har även stor betydelse vid utrymning. Vid bränder och övningar har det visat sig att människan undrar varför tunneln skall utrymmas då de varken ser rök eller brand. När de väl inser faran går de mot tunnelmynningen istället för att sätta sig i säkerhet i närmsta tillflyktsrum eller tvärtunnel¹ där utrymning kan ske.

De vanligaste bristerna vid de brandkatastrofer som inträffat är enligt [3]:

- Enkelrörstunnlar utan separation av trafiken
- Enkelrörstunnlar med mötande trafik saknar evakueringstunnlar
- Tillflyktsrum är svåra att upptäcka och ej tillräckligt skyddade mot brand
- Dålig övervakning av trafiken - ingen kontroll på vilka fordon som finns i tunneln
- Föråldrade säkerhetskrav - kan ej appliceras på dagens trafiksituation
- Brännbar beläggning i form av asfalt förvärrar branden
- Tillämpliga standarder saknas och inadekvata branddimensioneringsprocedurer används

¹ Tvärtunnel är en brandskyddad tunnel som förbinder tunnelrören vid flerrörstunnlar

Tabell 1: Sammanställning av nio europeiska tunnelbränder [2] [3][4].

Tunnel	Olycksdatum	Längd	Skador på tunnelkonstruktionen	Döda + skadade	Förstörda fordon/intensitet
Stora Bält Järnvägs-tunnel, Danmark	11 juni 1994	18 km Dubbelrör	Max avspjälkning på 270 mm av 400 mm betongelement på 27 m längd	0+0	Tunnelborrmaskin
Kanaltunneln, England	18 nov 1996	50 km Tre rör	Spjälkningsskador på 500 m, all betong 400 mm avspjälkad bitvis	0+35	28 tågagnar/ 370 MW 2,5 h
Mont Blanc-tunneln, Frankrike-Italien	24 mars 1999	11,6 km Enkelrör	Betongtak kraftigt avspjälkat	39+	23 Lastbilar, 10 bilar, 1 MC, 2 brandbilar/ 380 MW 3-5,5 h
Tauerntunneln, Österrike-Italien	29 maj 1999	6,4 km Enkelrör	Kollaps och kraftig avspjälkning av betongtak	12+80	14 lastbilar, 26 bilar/ 400-600 MW 3-6 h
Kaprun linbanetunnel, Österrike	11 nov 2000	3,4 km	Uppgift saknas	155+	15-50 MW 30-40 min
Gleinalmtunneln, Österrike	6 aug 2001	8 km Enkelrör	Uppgift saknas	5+4	Uppgift saknas
S:t Gotthardtunneln, Schweiz	24 okt 2001	16,9 km Enkelrör	Viss avspjälkning av betong	11+	13 lastbilar, 4 vans, 6 bilar

De vanligaste orsakerna till att en fordonsbrand startar i en tunnel är överhettning kombinerad med läckage eller elfel, bränder som börjar i motorutrymme samt efter kollision. Enligt statistik så är det nästan alltid stora fordon som bussar, lastbilar och tankbilar som orsakar de stora brandolyckorna. Därför är det viktigt att dimensionera för bränder i stora fordon. Sannolikheten att en stor tankbilsolycka ska inträffa är mycket liten, men om den gör det kan det bli omfattande konsekvenser. De flesta bränder som uppstår i tunnlar är i personbilar, men dessa bränder blir inte så stora. I Tabell 2 visas hur stor brandeffekten är för olika typer av fordon. Dessa värden bör ses som riktvärden eftersom brandeffekten varierar med så många olika faktorer. Vid bland annat branden i Mont Blanc-tunneln har medelbrandeffekten uppskattats till 150-190 MW med ett toppvärde på 380 MW. I nyligen utförda tunnelförsök [5] har också märkbart större värden uppmätts än de som redovisas i Tabell 2.

Tabell 2: Brandeffekt för olika typer av fordon [6].

Typ av fordon	Brandeffekt
1 liten personbil	2.5 MW
1 stor personbil	5 MW
2-3 personbilar	8 MW
1 skåpbil (van)	15 MW
1 buss	20 MW
1 långtradare	20-30 MW

2.2 Brandlaster

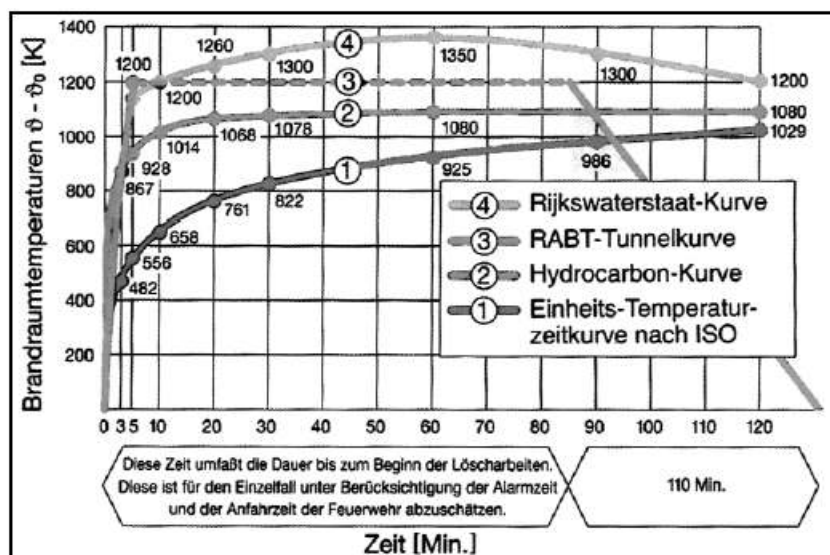
Vid dimensionering av tunnlar finns det flera olika brandlaster som kan väljas beroende på vilken typ av brand som är troligast. Tillåts fordon med farligt gods passera tunneln krävs en större brandlast än om det bara är personbilar som tillåts passera. En viktig parameter vid dimensionering av tunnlar ur brandsynpunkt är trafikintensiteten. För ett enskilt fordon kan brandbelastningen nämligen variera mellan 5 000 MJ och 300 000 MJ [7] beroende på vilken typ av fordon det är. Andra viktiga parametrar är sannolikheten för att en viss brandbelastning ska uppkomma och den angivna brandeffekten och brandgasttemperaturen som branden kan utveckla.

I *Tabell 3* ges exempel på olika värden för maxtemperaturer vid tak i en tunnel för olika typer av fordon. I nyligen gjorda fullskaleförsök har det visat sig att man når höga temperaturer även för andra laster än farligt gods [5]. De höga temperaturer som uppkommer i tunnlar, 800-1 300°C, beror på att väggarna värms upp successivt och bidrar till mindre värmeförluster jämfört med ett rum med omslutande väggar. Detta leder i sin tur till högre brandgasttemperaturer. Vid dimensionering är det just brandgasttemperaturen som används och den kan beskrivas med hjälp av tid-temperaturkurvor.

Tabell 3: Riktvärden för maxtemperaturer vid tak i en tunnel för olika typer av fordon [6].

Olika typer av fordon	Maxtemperatur
Personbil	400°C
Buss	700°C
Långtradare med brännbart material	1 000°C
Tankbil, allmänt	1 200°C
Tankbil, extrema fall	1 400°C

Det finns ett antal tid-temperaturkurvor som visar sambandet mellan brandens varaktighet och brandgasens temperatur. Dessa kurvor används vid dimensionering av tunnlar. De vanligaste kurvorna är ISO 834-kurvan, HC-kurvan, RWS-kurvan och RABT-kurvan. Alla dessa kurvor representerar ett standardiserat brandförlopp, men är lite olika utformade beroende bland annat på olika länders krav, se *Figur 1*.



Figur 1: Tid-temperaturkurvor som används till branddimensionering av tunnlar, tidsaxeln ej i skala för RABT-kurvan [8].

2.2.1 ISO-kurvan

ISO 834-kurvan är en typ av cellulosa-kurva och har den lägsta maxtemperaturen av tid-temperaturkurvorna som behandlas här. Jämför man maxtemperaturen med riktvärdena i *Tabell 3* så motsvarar det en lastbil lastad med brännbart material. Cellulosa-kurvan är baserad på brandhastigheten hos de material som finns i vanligt byggnadsmaterial som är cellulosebaserade. ISO 834-kurvan används i TUNNEL99 [9] och BV TUNNEL, VV Publ 1999:138

[10] men är framtagen för byggnader med sex omslutande ytor och ventilationsöppningar i väggarna. I vanliga fall så har man i tunnlar längsgående ventilation och rör i stället för rum, vilket innebär att denna tid-temperaturkurva inte är helt relevant för brandförloppet i tunnlar [11].

2.2.2 HC-kurvan

HC-kurvan, där HC står för HydroCarbon, har en snabb temperaturökning i början, men har dock inte lika hög maxtemperatur som de högsta riktvärdena enligt *Tabell 3*. HC-kurvan utvecklades för att det behövdes en tid-temperaturkurva som tog hänsyn till en snabbare brandhastighet, som till exempel för bensin, gas och kemikalier, än vad cellulosa-kurvan har, som är baserad på trä. HC-kurvan är baserad på en standardiserad brandtyp och kan tillämpas vid till exempel en brand i en tankbil med olja. Irland tillämpar HC-kurvan med 180 minuters intensitet vid alla nya tunnelbyggnationer. Även HC-kurvan används i både TUNNEL99 och BV TUNNEL [11].

2.2.3 RABT-kurvan

RABT-kurvan, som har tyskt ursprung där RABT står för Richtlinie für die Ausstattung und Betrieb von Strassentunneln², säger att tunnelkonstruktionen ska klara av en brand upp till 1 200°C följt av en avsvlningsfas på 110 minuter. RABT-

² Riktlinjer för utformning och bruk av vägtunnlar

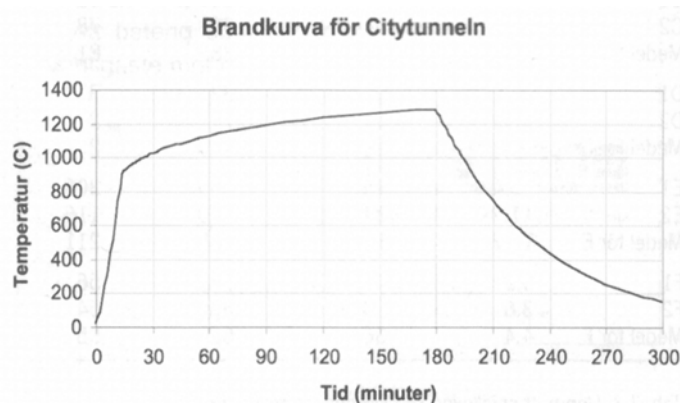
kurvan har det snabbaste uppvärmningsförloppet av tid-temperaturkurvorna, redan efter fem minuter når kurvan sitt maximum på 1 200°C. Intensiteten på kurvan kan varieras, det viktiga är dock avsvlningsfasen på 110 minuter. Kurvan ska motsvara brandförloppet vid en vanlig lastbilsbrand och motsvarar därmed riktlinjerna givna i *Tabell 3*. I Frankrike används en liknade kurva med 50°C lägre maxtemperatur och i Japan används RABT-kurvan med 120 minuters intensitet på alla brandskyddade tunnlar. I Sverige är denna kurva inte så välanvänd och den saknas i till exempel TUNNEL99 och BV TUNNEL [11].

2.2.4 RWS-kurvan

RWS-kurvan har sitt ursprung i Holland från RijsWaterStaat³ där man har höga krav på tunnelkonstruktioner. Kurvan har en hastig temperaturökning i början och stiger upp till 1 350°C⁴ efter en timma för att sedan sjunka gradvis till 1 200°C efter två timmar. Kurvan ska simulera brandförloppet för en tankbil med farligt gods, eller liknande, med en brandlast upp emot 300 MW med en varaktighet på 120 minuter. Dessa krav kommer bland annat från att det finns många sänktunnlar⁵ i Holland. Kurvan motsvarar i stort sett riktlinjerna i *Tabell 3* där maxtemperaturen för en brand i en lastbil med farligt gods uppskattas till 1 400°C. RWS-kurvan finns med i både TUNNEL99 och BV TUNNEL. Skillnaden mellan HC-kurvan och RWS-kurvan är att HC-kurvan är baserad på ett mera öppet utrymme där det kan ske värmeförluster [11].

2.2.5 Andra tid-temperaturkurvor

Det finns fler tid-temperaturkurvor än ovan nämnda som inte nämns i alla standarder. Ett exempel är citytunnelkurvan som tagits fram i samband med byggandet av Citytunneln i Malmö, se *Figur 2*.



Figur 2: Tid-temperaturkurva som tagits fram för Citytunneln i Malmö [12].

Citytunnelkurvan har det mest realistiska brandförloppet genom en snabb upphettning och hög maxtemperatur samt en avsvlningsfas på två timmar. Tid-temperaturkurvan ska motsvara den brandbelastning som förväntas från ett brinnande modernt passagerartåg [12]. En annan kurva är Götatunnelkurvan, den har använts vid beräkningarna av Götatunneln. GT-kurvan ser ut som RWS-kurvan, men har utöver de 120 min varaktighet en lång avsvlningsfas.

³ motsvarighet till det svenska näringsdepartementet

⁴ smältpunkt för betong

⁵ Tunnlar som sänks ner tex under vatten

2.2.6 Avsvälning

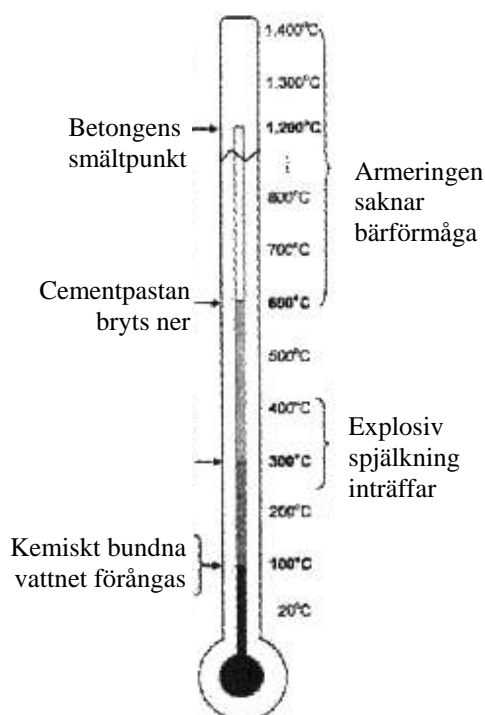
Det har visat sig att avsvälningen har spelat stor roll vid temperaturfördelningen i konstruktionen. Efter att maxtemperaturen uppnåtts kommer värmen att fortsätta att vandra inåt i betongen under hela avsvälningssfasen. Detta trots att den applicerade brandlasten minskar.

2.3 Betongkonstruktioners beteende vid brandpåverkan

Betongkonstruktioner anses ha god brandbeständighet jämfört med till exempel rena stålkonstruktioner. Hur konstruktionen beter sig vid en brandbelastning kan beskrivas med hjälp av hur betongen och armeringen fungerar var för sig, samt genom en samverkan mellan materialen.

2.3.1 Betongens beteende

Det som händer med betong när den utsätts för höga temperaturer är att cementpasta och ballast genomgår både en fysikalisk och kemisk nedbrytning. Vid 100°C börjar det kemiskt bundna vattnet att förångas. Cementpastan ökar något i volym upp till 200°C, men minskar därefter. Det förångade vattnet bygger upp ett tryck inuti betongen och redan vid 300-400°C sker en explosiv spjälkning av betongens täcksikt. Vid ca 600°C sker den kraftigaste nedbrytningen av cementpastan då den sönderdelas till fri kalk och vatten, som förångas. Ballastvolymen ökar kontinuerligt, ju högre temperatur, desto större blir den. Närmare 1 200-1 350°C börjar betongen smälta. Förloppet illustreras i *Figur 3*.



Figur 3: Betongens och armeringens materialbeteende vid olika temperaturer [13].

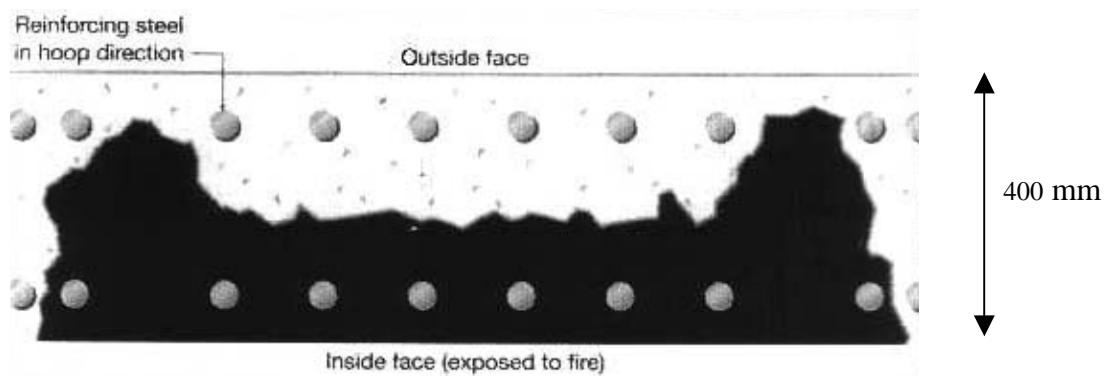
2.3.2 Armeringens beteende

Då armeringen utsätts för höga temperaturer minskar hållfastheten avsevärt med temperaturen. Oftast är det armeringens egenskaper som avgör bärförmågan vid brand. Redan vid ca 550°C har hållfastheten halverats och vid 700°C har armeringen förlorat nästan all hållfasthet. Kallbearbetad armering samt höghållfast stål är känsligare för upphettning än varmvalsade. Vid 400°C har sträckgränsen och brottgränsen minskat till samma nivå som för varmbearbetad armering. Genom detta förloras effekten av efterarbetningen hos det kallbearbetade stålet [14].

2.3.3 Armerade betongkonstruktioner

I de större tunnelbränder som inträffat hittills har det inte varit några allvarliga problem med bärförmågan trots stor avspjälkning [7]. Detta beror till största delen på att de utsatta tunnarna varit bergstunnlar klädda med betong och att av de problem som uppstår är just betongspjälkningen det största. I bergstunnlar är det berget som tar

den större delen av lasten, för rena betongtunnlar blir det annorlunda då betongen spjälkas bort och bärförmågan reduceras därav. Detta sker på grund av de stora temperaturgradienterna och vattnet som finns i betongen, både det kemiskt bundna samt vattnet i porerna. Armerad betong kan spjälkas sönder så pass mycket att hela täckskiktet till armeringen försvinner, vilket leder till stora problem med bärförmågan. *Figur 4* visar spjälkningsdjupet efter branden i Stora Bälttunneln. Det svarta är bortspjälkad betong och det betydligt mer än bara täckskiktet som spjälkades bort.



Figur 4: Spjälkningsdjup i betonginklädnad i Stora Bälttunneln [3].

Spjälkning inträffar vanligtvis i tät eller fuktig betong där det finns en risk att vattenångan inte kan transporteras bort i samma takt som porvattnet förångas. När trycket överstiger draghållfastheten sprängs betongen sönder. Vid en brand kommer den zon där porvattnet förångas att röra sig inåt i konstruktionen, vilket ger en längre transportväg för vattenångan till ytan. Höghållfasthetsbetong, vilken har en tätare porstruktur än vanlig betong, löper större risk för spjälkning eftersom det är svårare för fukten att tränga ut genom porerna.

Risken för spjälkning beror på en hel del olika faktorer, de främsta är:

- Fukthalten, bör ej överstiga 2-3 vikts-% [13]
- Tryckspänningar av yttre last eller förspänning
- Uppvärmningshastigheten, kritisk gräns 3°C/min [13]
- Temperaturfördelningen
- Tvärsnittsutformningen
- Armeringstätheten
- Betongens täthet

För att minska risken för spjälkning kan man låta betongen torka ut ordentligt och därmed få en tillräckligt låg fukthalt. Det kan dock vara svårt att få tillräckligt låg fukthalt i konstruktioner under mark där det råder svala och fuktiga förhållanden. För att undvika spjälkning kan tunneln även isoleras invändigt så att betongen inte blir utsatt för lika höga temperaturer och därmed minskar de temperaturrelaterade spänningarna. Polypropylenfibrer kan även blandas in i betongen vid gjutning. När betongen värms upp smälter fibrerna och bildar ett finmaskigt nät av porer som kan transportera ånga och utjämna övertryck, detta enligt [6].

2.4 Dimensionering av brandbelastade betongtunnlar

För branddimensionering finns det väl utarbetade normer och standarder för byggnader som i grund och botten bygger på simuleringar och provningar. För tunnlar finns det inte lika väl utarbetade normer, samt att det inte har utförts lika många provningar. Det är först på senare år, genom de inträffade tunnelkatastroferna som tunnelbränder har uppmärksammats mer och mer.

De riktlinjer som vanligtvis följs vid dimensionering av tunnlar är TUNNEL99⁶, BV⁷ TUNNEL, BBR⁸, BKR⁹, Brandteknisk dimensionering av betongkonstruktioner av Yngve Anderberg och Ove Pettersson samt ANV 0162 Branddimensionering av betongtunnlar [15] som tagits fram i samband med byggandet av Ringen och Yttre Tvärleden i Stockholm. Det finns avancerade beräkningsprogram som simulerar en brand, men dessa används inte i så stor utsträckning av tunnelkonstruktörer utan mer specialister.

Brandlasten fås från de tid-temperaturkurvor som finns i till exempel TUNNEL99 och därefter beräknas temperaturen i konstruktionen enligt diagram eller finita element-program. Täcksikt till armeringen antas spjälka bort i ett tidigt skede och reducerade tvärsnitt används i dimensioneringen. På trycksidan dras vanligtvis en gräns runt 450°C och betong med högre temperatur anses vara överksam.

⁶ Vägverkets regler

⁷ Banverket

⁸ Boverkets ByggRegler

⁹ Boverkets KonstruktionsRegler

3 Götatunneln - en fallstudie

Det objekt som ska studeras är Götatunneln som är en del av Götaledens nya sträckning i Göteborg, se *Figur 5*. Anledningen till att detta objekt valts är att Reinertsen har varit med och dimensionerat betongtunneln vid Lilla Bommen. Genom olika lastfall har temperaturfördelningar beräknats med och utan brandisolering. Med hjälp av temperaturfördelningarna har sedan en dimensionering gjorts. Syftet är att se vilka konsekvenser det blir om en större brand skulle inträffa, samt vilka konsekvenser de olika lastfallen ger på resultatet.

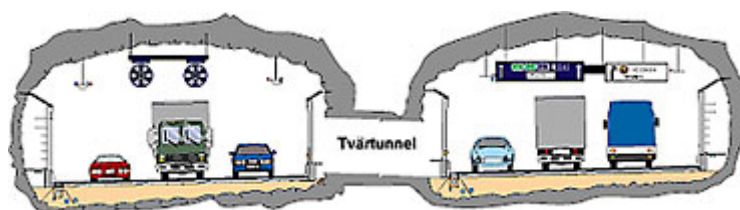
3.1 Götatunneln

Götaleden med Götatunneln är en viktig länk såväl i kommunens huvudvägssystem som i det nationella stamvägnätet. Leden utgör med sina 65 000 fordon/dygn en tungt trafikerad led mellan centrala staden och södra älvstranden samtidigt som den alstrar miljöproblem såsom buller och luftföroreningar. Genom att Götaleden byggs in i en tunnel skapas bättre miljö och ökad trafiksäkerhet [16].

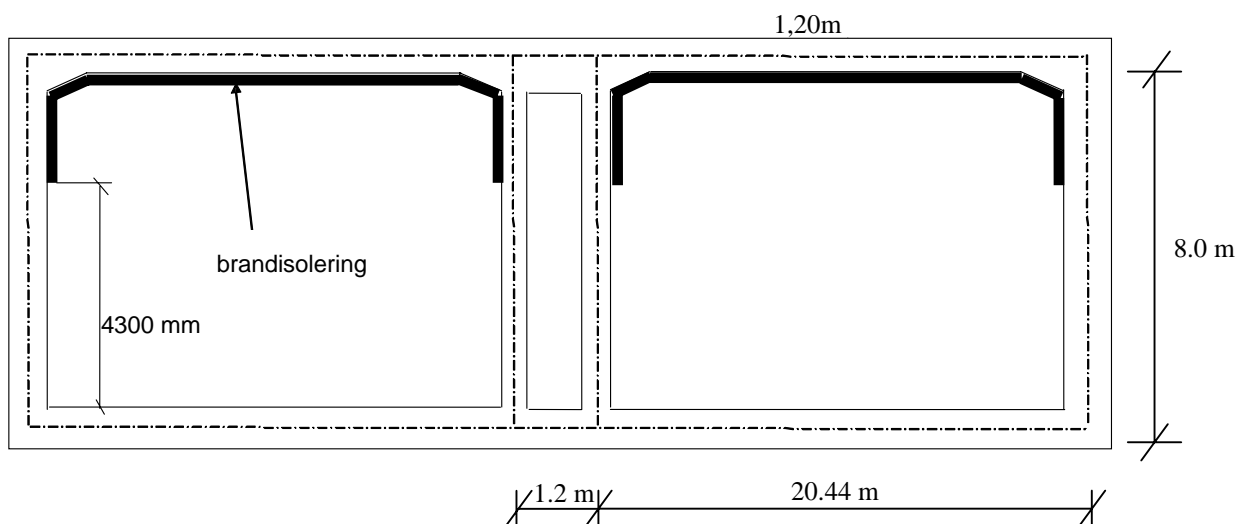


Figur 5: Sträckning av Götaleden samt Götatunneln i centrala Göteborg, streckad linje är tunnelsträckning [16].

Götatunneln utformas som en dubbelrörstunnel med två separata tunnelrör, ett för varje färdriktning, se *Figur 6*. Varje tunnelrör får tre körfält. Hela vägbyggnaden omfattar en sträcka av 3 km, varav själva tunneln är 1,6 km. I projektet ingår trafikplatser i anslutning till de båda tunnelmynningarna. Själva tunneln består av ca 1000 m bergstunnel, två betongtunnelrör á 210 m vid Lilla Bommen, som konstrueras av Reinertsen, samt två betongtunnelrör á 360 m vid Järntorget [16].



Figur 6: Tvärsektion av Götatunneln, bergstunneln [16].

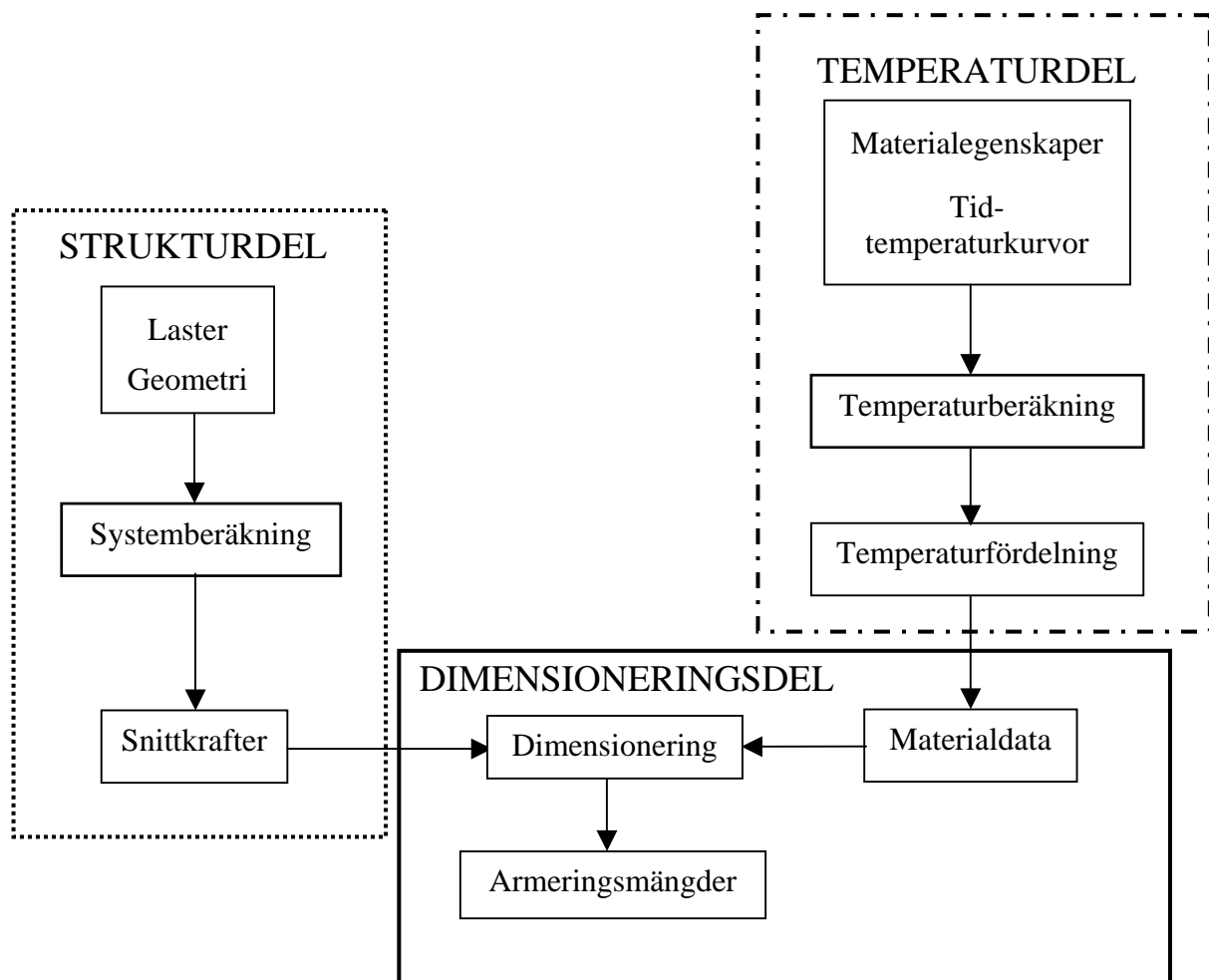


Figur 7: Sektion av Götatunneln som studerats (ej i skala).

I detta examensarbete har taket i det södra tunnelröret vid Lilla Bommen studerats, geometri enligt *Figur 7*. Anledningen till att det södra röret valts är att det har störst spännvidd och ger därför större snittkrafter än det norra röret. De laster som tagits hänsyn till vid beräkningarna är bland annat egentygden av jord, jordtryck vattentryck trafiklast. Brandisolering är applicerad, där brandbelastningen blir som störst vid en brand, vid taket och en bit ner på väggarna. Vid dimensionering har endast sektionen i tvärlängd studerats, ej längsled.

3.2 Metodik och omfattning

Beräkningarna har delats upp i tre delar; en strukturdelen, en temperaturlast samt en dimensioneringsdel. Detta på grund av att det är så man går till väga vid dimensionering idag och därför har temperaturlasten ej tagits med i systemberäkningarna. I *Figur 8* nedan ses en översikt av tillvägagångssättet vid dimensioneringen.



Figur 8: Översikt av tillvägagångssätt vid dimensioneringen

Strukturdelen (streckad ruta ovan) har Reinertsen gjort och används som indata till dimensioneringen. Systemberäkningen görs för en meterstrimla och ramen modelleras med balkelement i systemlinjen. Från dessa beräkningar fås de snittkrafter, som moment med tillhörande normalkraft för olyckslast, som används vid dimensioneringen.

I temperaturdelen (punktstreckad ruta ovan) har materialegenskaper, geometrier samt olika tid-temperaturkurvor använts för en temperaturberäkning. Föra att simulera brandförloppet har tre olika tid-temperaturkurvor med och utan brandisolering studerats, totalt sex olika fall. Dessa sex fall har gett en temperaturfördelning och med hjälp av temperaturfördelningen har nya materialdata erhållits. Se kapitel 4.

I dimensioneringen (heldragen ruta ovan) har snittlasterna och geometrin från strukturdelen och materialdatan från temperaturdelen använts för att reducera tvärsnittet och utifrån det bestämma armeringsmängder för både moment och tvärkraft. Vid dimensioneringen har endast två lastfall studerats, den brandbelastning som använts när Reinertsen branddimensionerat Götatunneln med och utan brandisolering. Se kapitel 5 och framåt.

3.3 Datorprogram

För att kunna göra beräkningarna ovan har fyra olika beräkningsprogram använts. Dessa beskrivs mer nedan.

3.3.1 SOLVIA

Det första programmet som användes var SOLVIA-Temp. Det användes för att beräkna temperaturfördelningen i betongen. FE-programmet SOLVIA är utvecklat av SOLVIA Engineering AB. SOLVIA-Temp är ett vanligt temperaturanalysprogram (ej specifikt för brandsimuleringar) där transient analys använts. Resultaten kan visas genom att plotta grafer, till exempel temperaturfördelningar i konstruktionen. Man kan även plocka ut resultatlistor med temperaturfördelningarna och behandla resultaten i andra program [17], [18].

3.3.2 MatLab

Det andra beräkningsprogrammet som användes var MatLab. Det användes vid dimensioneringen där ett huvudprogram skapades med flertalet olika funktionsfiler för olika delberäkningar som anropas i huvudprogrammet. MatLab är ett interaktivt program för tekniska beräkningar och visualiseringar av data, utvecklat av The MathWorks, Inc. Det använder ett matris/vektororienterat programmeringsspråk där egna funktionsfiler och program kan göras [19].

3.3.3 Strip-Step

Systemberäkningarna (som gjorts av Reinertsen) av tunneln görs med datorprogrammet StripStrep 2 som är ett 2D-ramprogram. Beräkningarna utförs med balkelement enligt linjär elasticitetsteori [20].

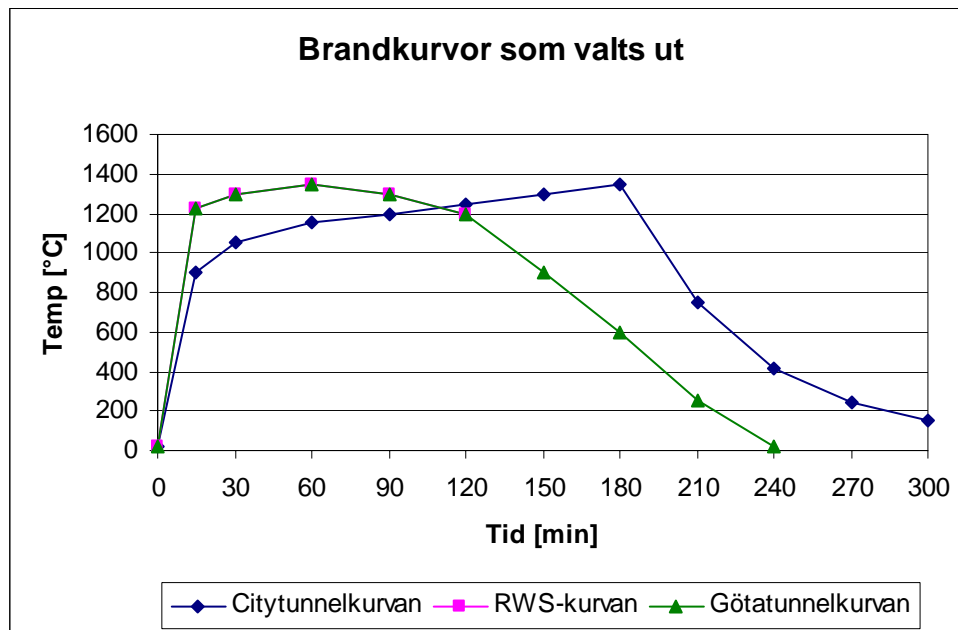
4 Temperaturberäkningar

4.1 Förutsättningar

Temperaturberäkningarna har gjorts med tre olika tid-temperaturkurvor. De studerade tid-temperaturkurvorna skiljer sig åt när det gäller form, högsta temperatur och varaktighet. Beräkningarna har utförts både med och utan brandisolering.

4.1.1 Tid-temperaturkurvor

De tid-temperaturkurvor som har valts ut är; RWS-kurvan; kurvan som användes för branddimensionering av Götatunneln (GT-kurvan); och Citytunnel-kurvan (CT-kurvan), se *Figur 9*. RWS-kurvan har en hög maximal temperatur vilket visat sig vara möjligt även för material som anses vara mindre farliga. GT-kurvan är baserad på RWS-kurvan men har dessutom en lång avsvlningsfas, vilket RWS-kurvan saknar. CT-kurvan har nästan samma maximala temperatur som RWS-kurvan, men når inte den förrän efter 180 minuter då den långa avsvlningsfasen inträffar.



*Figur 9: De tid-temperaturkurvor som valts ut för temperaturberäkningarna0.
RWS=RWS-kurvan, GT=Götatunnelkurvan samt CT=Citytunnelkurvan*

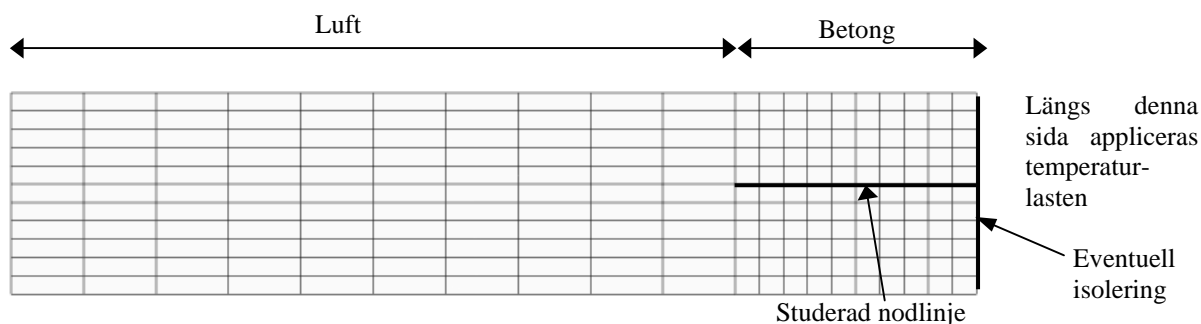
4.1.2 Geometri

Den konstruktion som kommer att studeras är Götatunneln och den del som är av störst intresse är taket i och med att belastningen är som störst där vid en brand. Totalt sett kommer sex olika fall att studeras, varje tid-temperaturkurva med och utan brandisolering. En översikt av de sex fallen kan ses i *Tabell 4*.

Tabell 4: Översikt av de sex olika lastfallen.

Fall	Tid-temperaturkurva	Isolering
1	Götatunnelkurvan	Utan
2	RWS-kurvan	Utan
3	Citytunnelkurvan	Utan
4	Götatunnelkurvan	Med
5	RWS-kurvan	Med
6	Citytunnelkurvan	Med

Tunneltaket som är 1,2 m tjockt modelleras i SOLVIA inklusive en luftcell på den sida av taket som inte är brandbelastad. Indatafiler för varje lastfall finns i *Appendix A*. Brandlasten appliceras som en temperaturlast direkt på betongen, det vill säga utan övergångsmotstånd, för fallen utan brandisolering. För fallen med brandisolering appliceras brandlasten direkt på brandisoleringen som är ungefär tre centimeter tjock. Brandisoleringen som använts i beräkningarna är densamma som i Götatunneln. I *Figur 10* visas elementindelningen som har använts i analyserna. Den temperatur som modellen antas ha innan brandlasten appliceras är 20°C. De temperaturanalyser som gjorts i SOLVIA är stationär, det vill säga transient.



Figur 10: Elementindelning av betongen och luftcellen.

4.1.3 Materialegenskaper

Materialegenskaperna som använts i beräkningarna framgår av *Tabell 5*. Värdena för värmeledningsförmågan, densiteten och den specifika värmekapaciteten är tagna ur [21] och [22] och den volumetriska värmekapaciteten har beräknats genom att multiplicera densiteten med den specifika värmekapaciteten.

Tabell 5: Materialegenskaper för brandisolering, betong och luft som använts i SOLVIA-Temp.

Material	Densitet [kg/m ³]	Specifik värme- kapacitet [Ws/kg]	Volumetrisk värmekapacitet [J/m ³ °C]	Värmelednings- förmåga [W/m°C]	Tjocklek [m]
Isolering	900	700	$0.6 \cdot 10^6$	0.16	0.027
Betong	2300	900	$2.11 \cdot 10^6$	1.7	1.2
Luft	1.2	1000	$1.2 \cdot 10^6$	0.025	3.6

Brandisoleringen som skall användas i Götatunneln och i beräkningarna består av silikatskivor som är framställda genom en speciell process med material som står emot höga temperaturer. De är utformade så att temperaturen i den bakomliggande betongen inte får överstiga 380°C vid en belastning av RWS-kurvan med en isoleringstjocklek på 27 mm. Isoleringen skyddar dessutom konstruktionen mot korrosion, fukt, salt och avgaser som kan påverka konstruktionens livstid negativt.

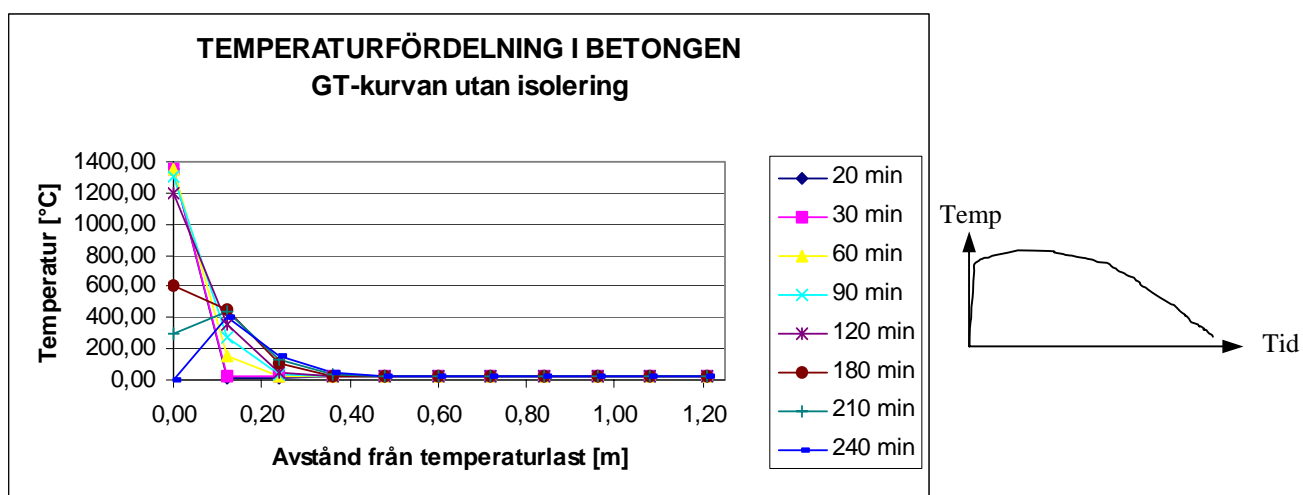
4.2 Resultat

Resultaten är uttagna längs en nodlinje mitt i betongtvärsnittet, se *Figur 10*. Noderna i luftcellen har ej tagits med på grund av att de inte påverkas i någon större grad av temperaturlasten. Resultaten sparades i form av listor för olika tidpunkter som sedan behandlades i Excel. Vilka tidpunkter som valdes samt temperaturfördelningen i betongen utan isolering kan ses i *Figur 11*, *Figur 13* och *Figur 14* nedan. Totalt valdes åtta stycken tidpunkter för varje lastfall. Tidpunkterna är desamma för respektive lastfall med eller utan isolering.

I *Figur 15*, *Figur 16* och *Figur 17* kan temperaturfördelningen i betongen med isolering ses. Här kan man tydligt se vad endast tre centimeter brandisolering kan innebära. Den maximala temperaturen i konstruktionen reduceras med ca 1 000 °C för alla tre tid-temperaturkurvorna. Det kritiska snittet, där betongen har en temperatur högre än 450°C ligger för fallen utan isolering runt 0,1 m från kanten. Enligt ANV0162 så bidrar inte betongen till lastupptagning om den är utsatt för mer än 450°C, övrig betong bibehåller den hållfasthet som gäller vid rumstemperatur. För fallen med isolering har betongen lägre temperatur än 450°C och inga kritiska snitt uppträder.

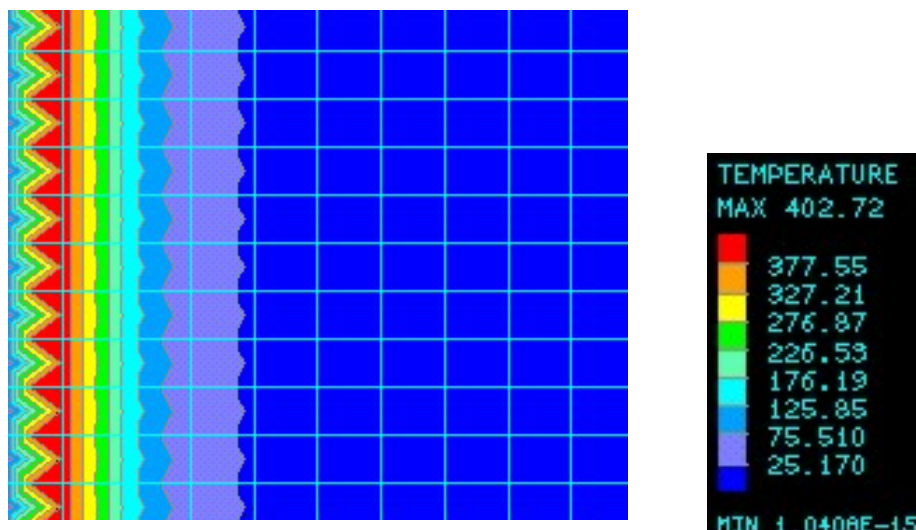
4.2.1 Lastfall 1

Lastfall 1 är det fall med Götatunnelkurvan utan brandisolering. I *Figur 11* kan man tydligt se den snabba temperaturökningen i början och hur temperaturen ökar sakta men säkert inåt i betongen. Man kan även se att trots temperaturen minskar så fortsätter värmen att vandra inåt i betongen. I detta fall är det vid 121 mm från temperaturlasten som det kritiska snittet uppträder, beräkning av detta se *Appendix B*.



Figur 11: Temperaturfördelning i betongen vid olika tidpunkter, Götatunnel-kurvan.

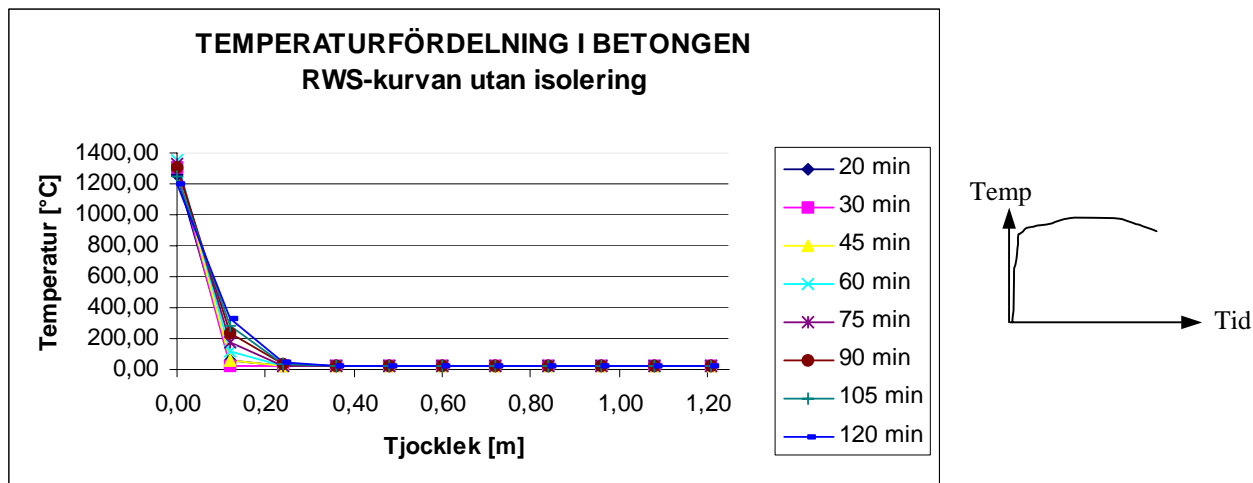
I *Figur 12* nedan visas temperaturfördelningen i betongen vid tidpunkten 240 minuter, sluttid för Götatunnelkurvan. Man kan tydligt se att den maximala temperaturen inte ligger i ytan där brandlasten applicerats, utan en liten bit in i betongen. Detta beror på avsvlningsfasen som nämnts tidigare.



Figur 12: Temperaturfördelning i betongen, Götatunnelkurvan tid=240 min

4.2.2 Lastfall 2

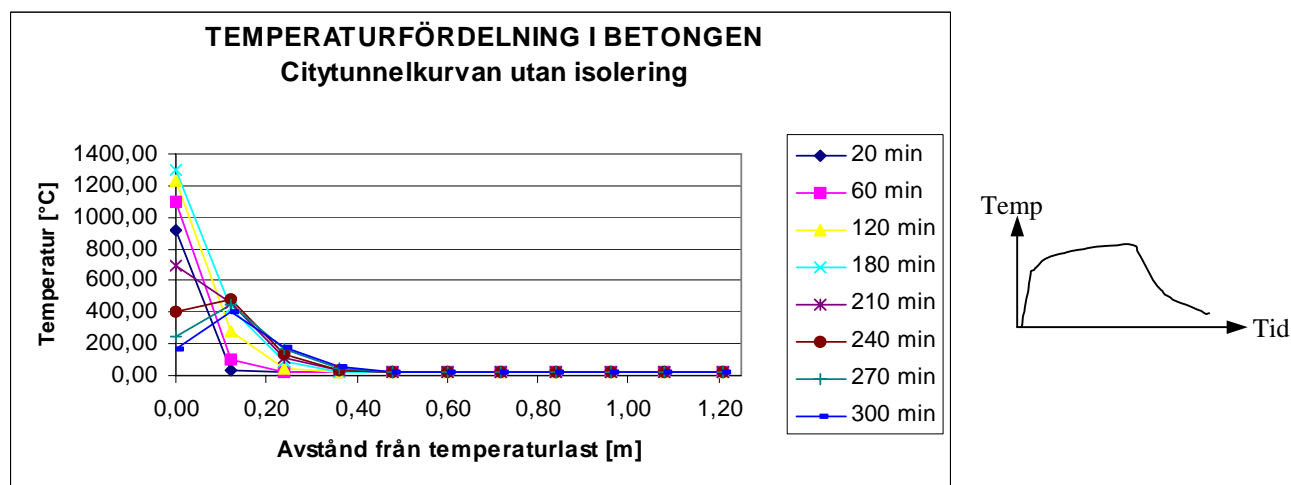
Lastfall 2 är det lastfall med RWS-kurvan utan brandisolering. RWS-kurvan saknar avsvlningsfas vilket leder till att temperaturvariationen inte är så stor. Linjerna för de olika tidsstegen följer varandra väldigt tätt och det är svårt att urskilja dem, se *Figur 13*. Den snabba temperaturökningen samt den konstant höga temperaturen, vilket är typiskt för RWS-kurvan, leder till att betongen uppnår en ganska hög temperatur snabbt i området där lasten appliceras. Temperaturspridningen blir dock inte så stor på grund av tid-temperaturkurvans korta intensitet, 120 min, samt att den saknar avsvlningsfas. I detta fall är det vid 97mm från ytan som det kritiska snittet ligger.



Figur 13: Temperaturfördelning i betongen vid olika tidpunkter, RWS-kurvan.

4.2.3 Lastfall 3

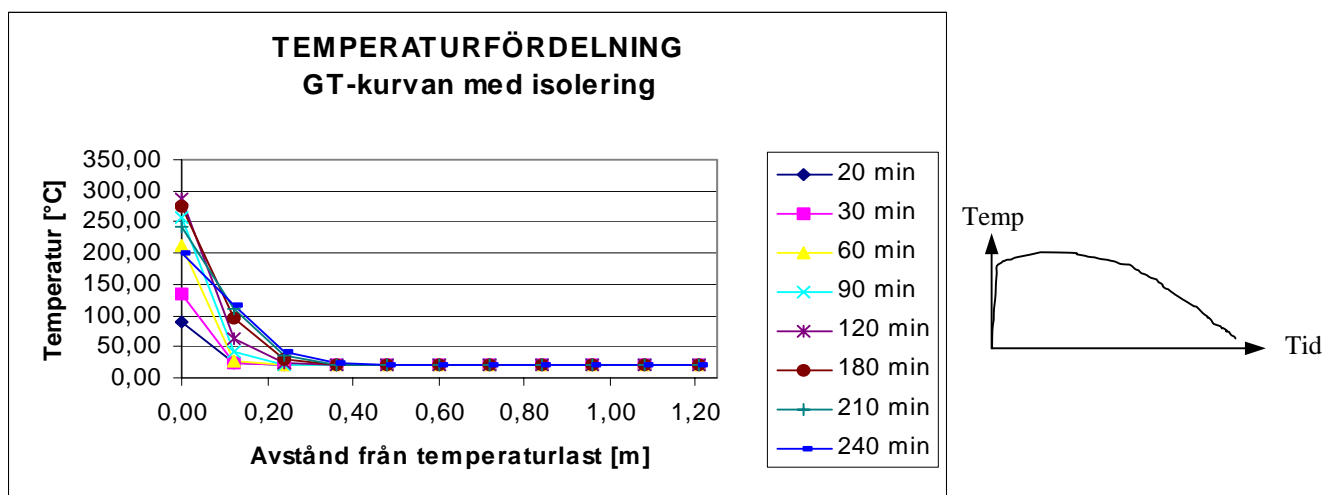
Lastfall 3 är det fall med Citytunnelkurvan utan brandisolering. I *Figur 14* kan man se hur betongen påverkas av Citytunnelkurvan. I början syns den snabba temperaturökningen tydligt och hur temperaturen ökar sakta men säkert inåt i betongen. Man kan även se, som vid GT-kurvan, att trots att temperaturen minskar så fortsätter värmen att vandra inåt i betongen. Det kritiska snittet för detta fall, som blir det största, ligger vid 130 mm från ytan där temperaturlasten appliceras.



Figur 14: Temperaturfördelning i betongen vid olika tidpunkter, Citytunnelkurvan.

4.2.4 Lastfall 4

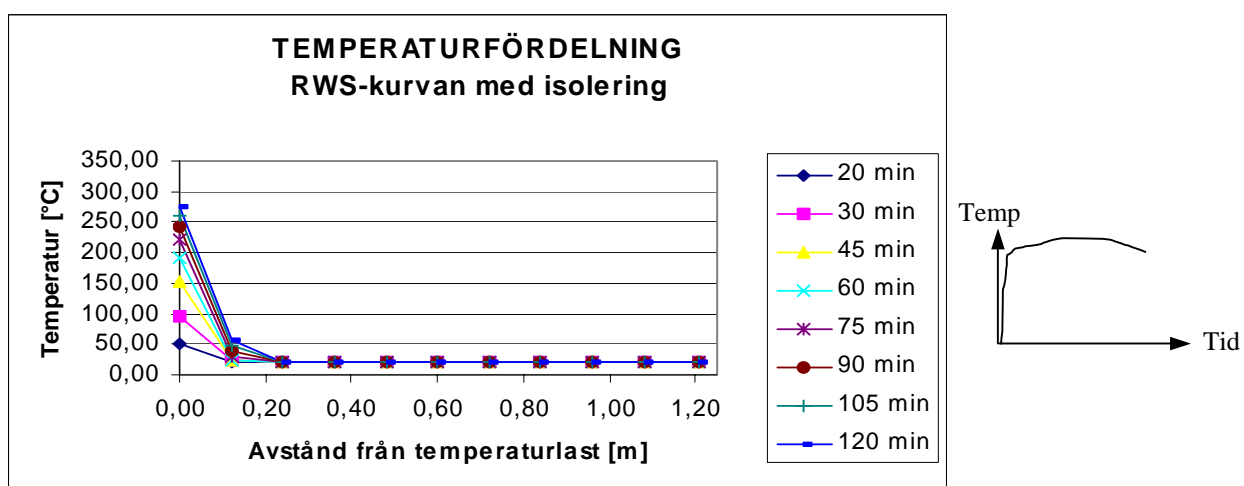
Lastfall 4 är det lastfall med Götatunnelkurvan med brandisolering. I följande fall ses att temperaturen inte når så extrema höjder, utan att brandisoleringen står emot värmen bra. I och med att GT-kurvan har en så snabb temperaturökning i början så ökar den nästan snabbast av de tre fallen med brandisolering och detta kan ses i *Figur 15*, för övrigt så skiljer sig inte fallen sig så mycket åt.



Figur 15: Temperaturfördelning i betongen med brandisolering vid olika tidpunkter, Götatunnel-kurvan.

4.2.5 Lastfall 5

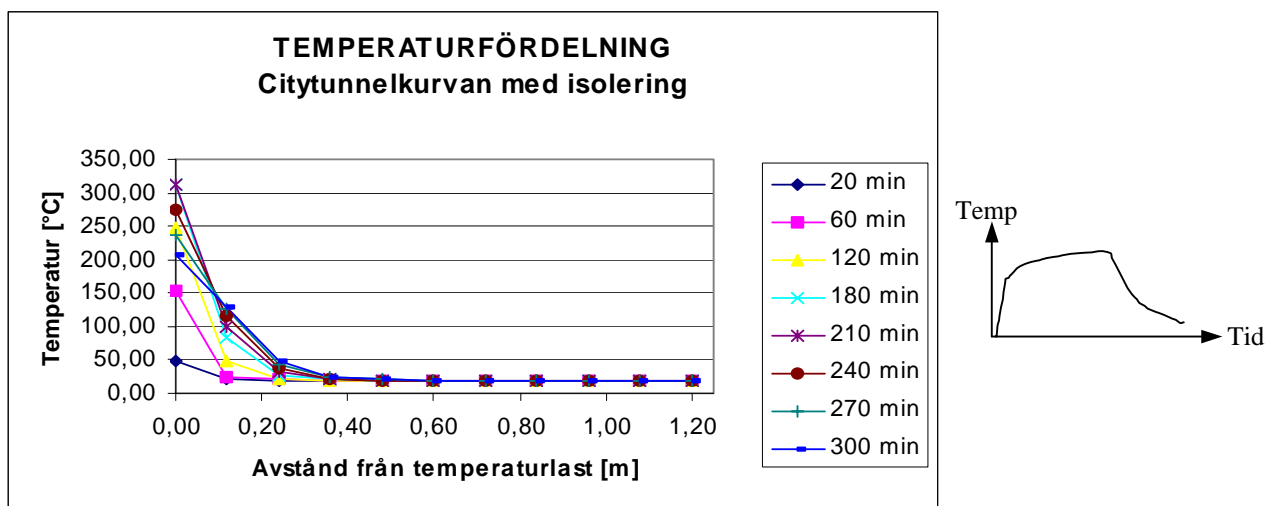
Lastfall 5 är det lastfall med RWS-kurvan med brandisolering. RWS-kurvan uppnår nästan samma maxtemperatur som GT-kurvan, men det tar lite längre tid för RWS-kurvan att uppnå samma temperaturer.



Figur 16: Temperaturfördelning i betongen med brandisolering vid olika tidpunkter, RWS-kurvan.

4.2.6 Lastfall 6

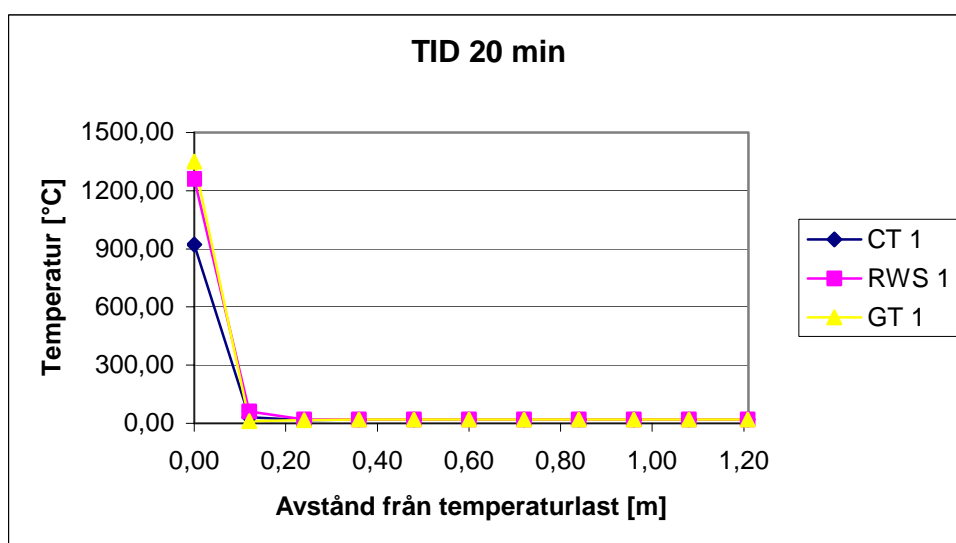
Lastfall 6 är det fall med Citytunnelkurvan med brandisolering. Det som skiljer detta fall från de övriga två är att kurvan har lite högre maxtemperatur samt att den når de höga temperaturerna inne i betongen snabbare.



Figur 17: Temperaturfördelning i betongen med brandisolering vid olika tidpunkter, Citytunnelkurvan.

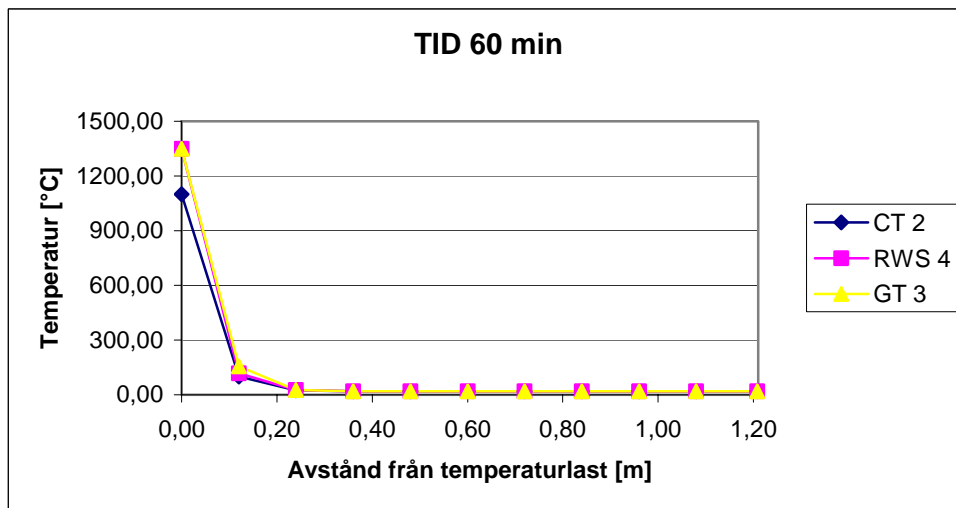
4.2.7 Uppvärmning

I figurerna nedan har tre tidpunkter under uppvärmningsfasen för lastfallen utan isolering studerats. Under själva uppvärmningsfasen skiljer sig kurvorna inte så mycket åt. I figurerna står en siffra efter beteckningen på vilken kurva som visas. I Figur 18 är det en etta, denna etta säger att tidpunkten 20 minuter är den första för alla tre fallen. Då de tre kurvorna har olika längd, men samma antal tidpunkter, sammanfaller inte alltid alla tidpunkterna.



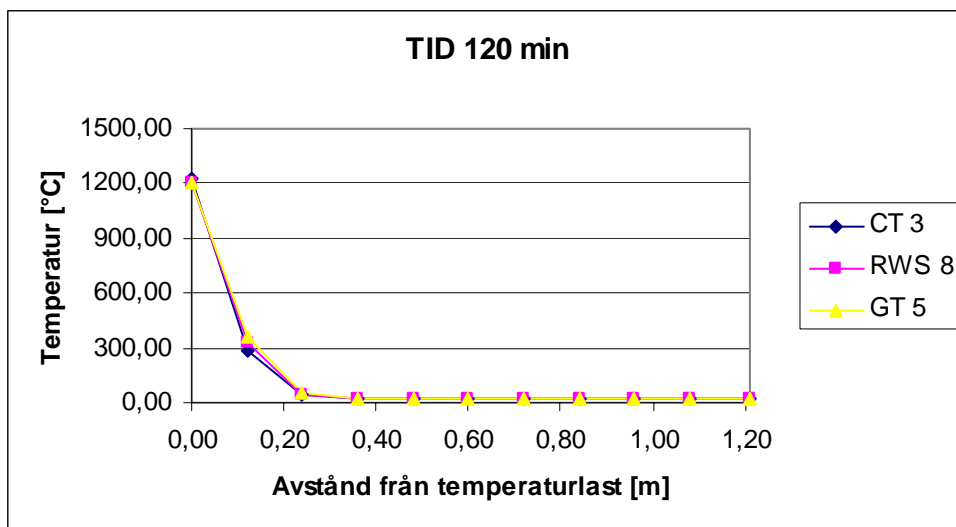
Figur 18: Temperaturfördelning vid $t=20$ min lastfall 1-3

Figur 18 visar temperaturfördelningen i snittet vid tidpunkten 20 minuter. RWS-kurvan och Götatunnelkurvan följer varandra åt och uppnår maxtemperaturen snabbt, medan Citytunnelkurvan har en lite långsammare uppvärmning. I Figur 19 är tidpunkten 60 minuter som är tidpunkt nummer 2 för Citytunnelkurvan, tidpunkt nummer 4 för RWS-kurvan och tidpunkt nummer 3 för Götatunnelkurvan.



Figur 19: Temperaturfördelning vid $t=60$ min lastfall 1-3

Vid tidpunkten 60 minuter har Citytunnelkurvan närmast sig de andra kurvorna och det skiljer inte så mycket i temperaturfördelningen, se Figur 19. Vid tidpunkten 120 minuter har Citytunnelkurvan hunnit ikapp de andra kurvorna och de följs nästan helt åt. Se Figur 20.

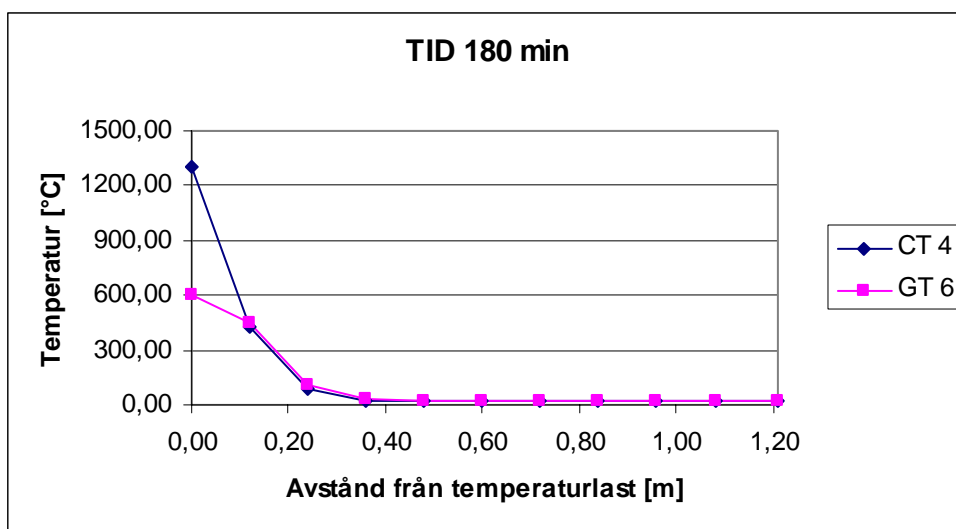


Figur 20: Temperaturfördelning vid $t=120$ min lastfall 1-3

4.2.8 Avsvälning

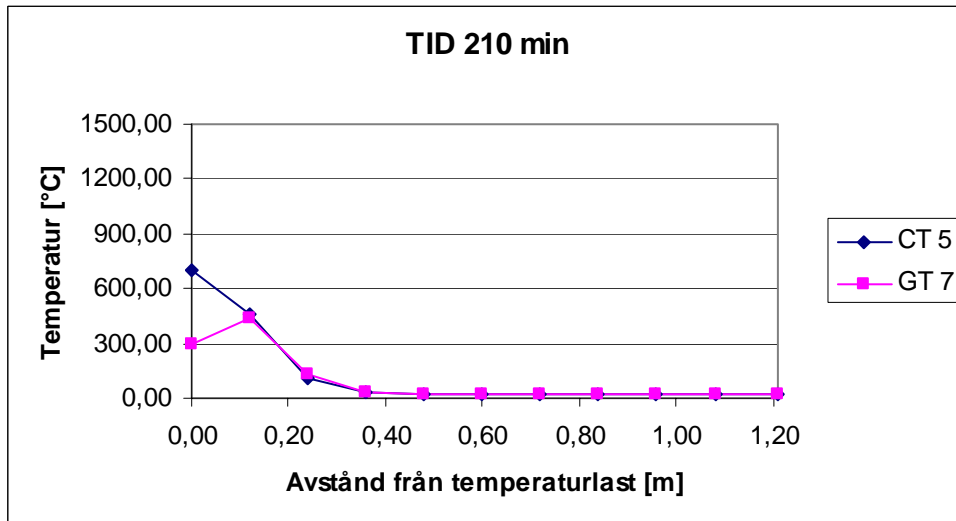
Avsvälningen har även den studerats för tre olika tidpunkter för lastfallen utan isolering. Då RWS-kurvan saknar avsvälningssfas har den ej tagits med. Det är under avsvälningen som lastfallen skiljer sig mest åt, vilket visar hur pass viktigt det är att ta

med avsvlningsfasen vid dimensionering. I *Figur 21* kan man se en skillnad i temperaturfördelningen på 700°C i den ände som temperaturlasten lagts på, där Citytunnelkurvan har den högre temperaturen. För övrigt så följs lastfallen åt.



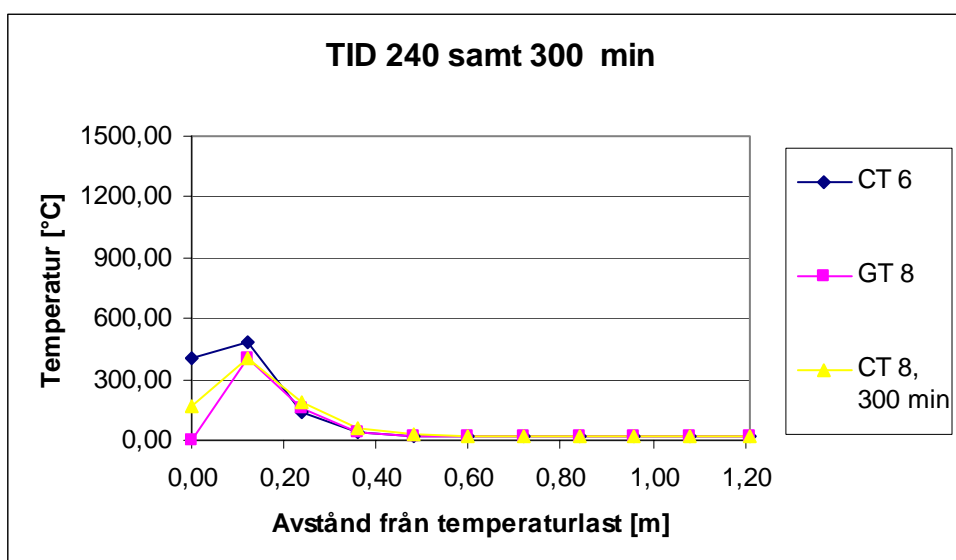
Figur 21: Temperaturfördelning vid t=180 min, lastfall 2-3.

Vid tidpunkten 210 min har även temperaturfördelningen i Citytunnelkurvan börjat sjunka. I *Figur 22* kan man även se att maxtemperaturen inte längre ligger i kanten för tvärsnittet, utan en bit in.



Figur 22: Temperaturfördelning vid t=210 min, lastfall 2-3.

Vid tidpunkten 240 minuter (sluttid för GT-kurvan) samt 300 minuter (sluttid för CT-kurvan) följer lastfallen varandra nästan helt. Det är inte någon större temperaturskillnad för de olika lastfallen. Även i *Figur 23* kan man se att maxtemperaturen ligger en bit in i tvärsnittet för alla lastfallen.



Figur 23: Temperaturfördelning vid $t=240/300$ min, lastfall 2-3.

4.2.9 Sammanfattning av resultat

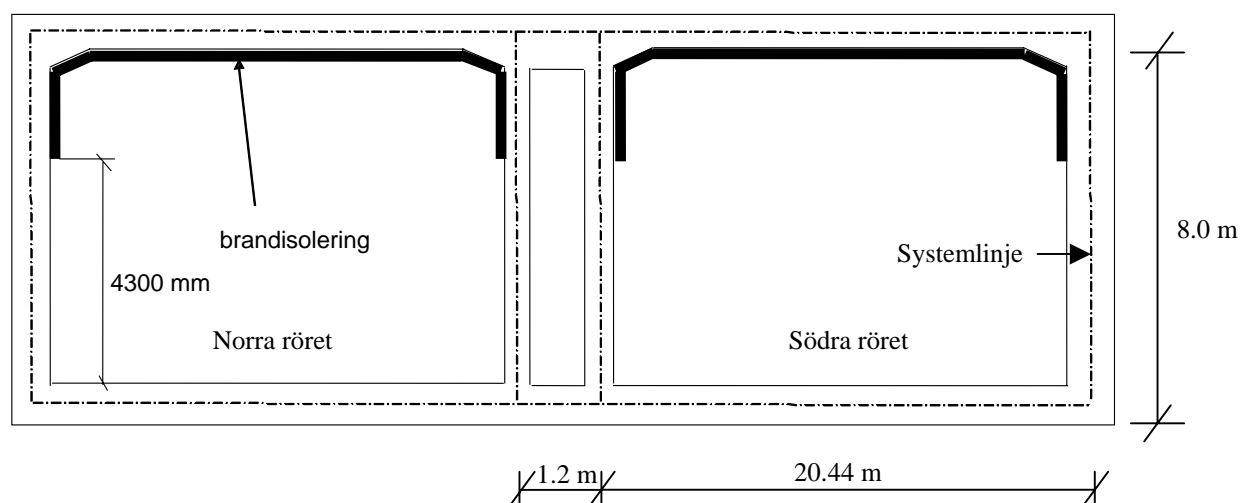
Det som skiljer lastfallen åt mest är avsvlningsfasen. Under själva uppvärmningen följer kurvorna varandra åt med undantag att Citytunnelkurvan når sin maxtemperatur något senare än de andra. Citytunnelkurvan har dessutom en längre avsvlningsfas än Götatunnelkurvan, vilket påverkar möjligheten för temperaturen att fortsätta vandra inåt i betongen. Brandisoleringens effekt är också avgörande, endast tre centimeter tjock isolering reducerar temperaturen med ca 1 000 °C för alla tre tidtemperaturkurvorna. Detta medför i sin tur att betongen inte förlorar sin kapacitet. För lastfallen utan isolering bidrar inte betongen till någon lastupptagning ca 100 mm in i tvärsnittet. I *Tabell 6* nedan kan armeringslagrens maxtemperatur ses samt vid vilken tidpunkt den inträffar för respektive lastfall. För de kurvor med avsvlning kan man tydligt se att maxtemperaturen i det andra armeringslagret inträffar i slutskedet av tidtemperaturkurvan, medan för RWS-kurvan strax efter maxtemperaturen uppnåtts i belastningsfallet.

Tabell 6: Armeringslagrens maxtemperatur samt vid vilken tidpunkt den inträffar

	Isolering	T(x1) [°C]	T(x2) [°C]	T(x3) [°C]	t(x1) [min]	t(x2) [min]	t(x3) [min]
GT-kurvan	Utan	953,1	455,0	208,1	67	185	169
	Med	214,5	115,9	60,4	169	158	208
RWS-kurvan	Utan	883,1	332,0	98,4	34	119	90
	Med	169,8	58,7	22,2	63	120	53
Citytunnelkurvan	Utan	949,3	490,2	244,2	124	203	218
	Med	236,0	129,8	69,2	143	300	227

5 Dimensioneringsförutsättningar

Vid dimensionering har, som nämnts tidigare vid temperaturberäkningarna, taket i det södra tunnelröret studerats, se *Figur 24*. Anledningen till att det södra röret valts är att det har störst spännvidd och ger därför större snittkrafter än det norra röret. Beräkningarna har gjorts i en linje, en systemlinje, placerad mitt i tvärsnittsdelarna för att förenkla beräkningarna. De laster som tagits hänsyn till vid beräkningarna är bland annat egentygden av jord, jordtryck, vattentryck samt trafiklast.



Figur 24: Sektion av Götatunneln som studerats (ej i skala).

5.1 Materialegenskaper

Materialvärden för betong och stål har beräknats enligt BBK 94 för olyckslast (brand) [23]. Dimensionerade värden beräknas enligt nedan, värdena redovisas i *Tabell 7*.

$$f_d = \frac{f_k}{\eta \cdot \gamma_m \cdot \gamma_n} \quad \text{och} \quad E_d = \frac{E_k}{\eta \cdot \gamma_m \cdot \gamma_n}$$

Vid olyckslast (brand) sätts γ_n till 1,0, $\eta \cdot \gamma_m$ till 1,2 för hållfasthetsvärdena för betongen och $\eta \cdot \gamma_m$ till 1,0 för armeringen samt E-modulen för betongen.

Tabell 7: Materialvärden för armeringen och betongen.

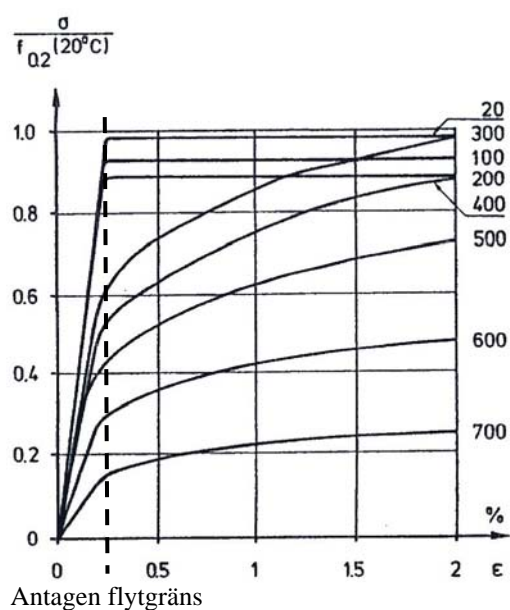
	Betong [MPa]	Armering [MPa]
f_{ctk} / f_{st}	2,10	500
E_{ck} / E_{sk}	33,0	200 000
f_{ct} / f_{st}	1,7	500
E_c / E_s	33,0	200 000

5.2 Förenklingar av materialegenskaper

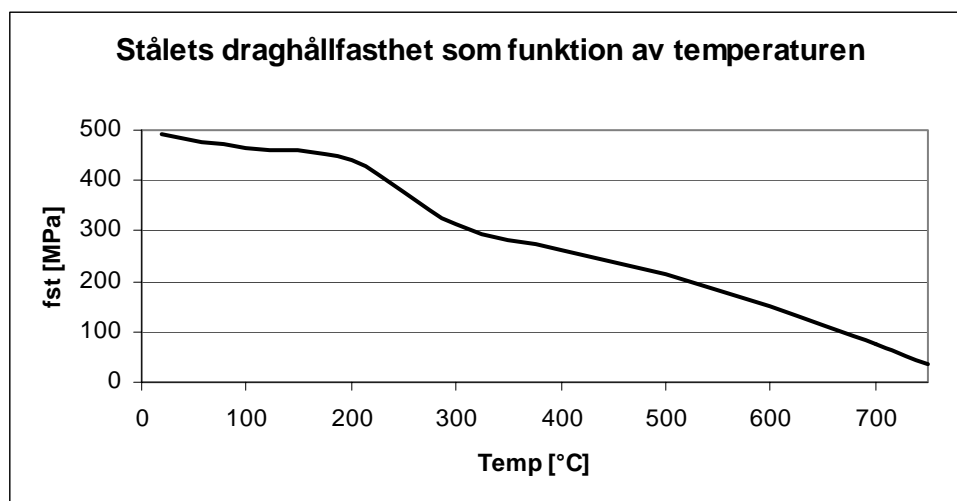
5.2.1 Stål (armeringen)

Enligt [24] varierar stålets flytgräns med temperaturen enligt *Figur 25*. För att förenkla dimensioneringen antas att stål plasticeras vid 0,2 % töjning, oberoende av temperatur, varefter spänningens nivå antas vara konstant. Att E-modulen varierar beaktas ej eftersom mängden armering kommer att bestämmas så att tvärsnittet blir normalarmerat, det vill säga armeringen flyter.

Vid en antagen flytgräns vid 0,2 % lästes temperaturen och den faktor som reducerar hållfastheten av. Faktorn multiplicerades sen med 500 MPa och diagrammet enligt *Figur 26* erhöles.



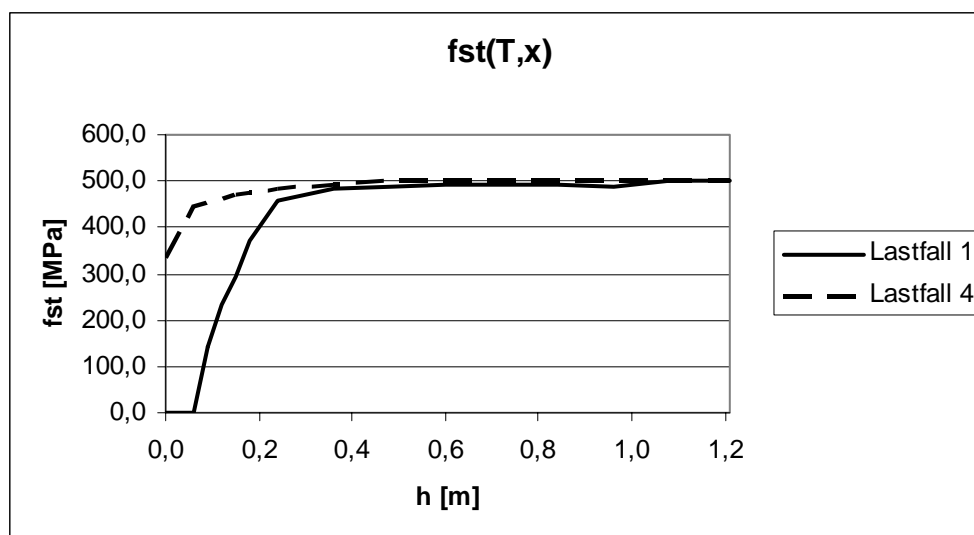
Figur 25: Dimensionerande arbetskurvor för varmvalsat stål [24].



Figur 26: Stålets draghållfasthet som funktion av temperaturen.

I *Figur 26* kan man se att stålet har god hållfasthet upp till cirka 200°C där den sjunker drastiskt upp till 300°C för att sedan fortsätta sjunka nära nog linjärt och vid 750°C antas hållfastheten vara noll.

I *Figur 27* visas hur ståldraghållfastheten varierar med maxtemperaturen i tvärsnittet. Vid lastfall 1 (Götatunnelkurvan utan isolering) kan man se att stålet i det första armeringslagret i tvärsnittet inte har någon kapacitet alls. Jämför man med lastfall 4 (Götatunnelkurvan med isolering) så har isoleringen stor betydelse och hållfastheten i det första armeringslagret har inte försämrats så mycket.



Figur 27: Ståldraghållfasthetens variation i tvärsnittet med maxtemperaturen.

Med hjälp av temperaturfördelningen för varje lastfall, centrumavstånden till varje armeringslager och *Tabell 7* har stålhållfastheten sedan beräknats för varje lastfall, se *Tabell 8*. Vid temperaturer över 750°C antas stålet inte ha någon kapacitet kvar alls.

Tabell 8: Stålhållfasthet för varje armeringslager och lastfall.

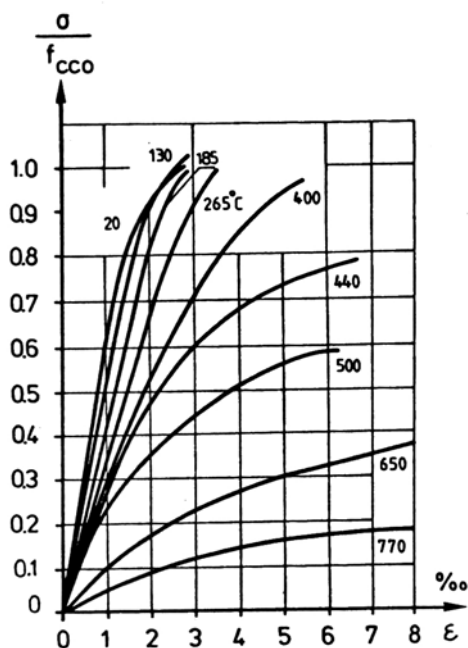
	Isolering	fst(T,x1)	fst(T,x2)	fst(T,x3)	fst(T,x1)	fst(T,x2)	fst(T,x3)
		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[%]
GT-kurvan	Utan	0,0	234,7	429,8	0	45	86
	Med	421,7	462,9	479,2	84	93	96
RWS-kurvan	Utan	0,0	296,2	468,0	0	59	94
	Med	447,0	479,7	490,4	89	96	98
Citytunnelkurvan	Utan	0,0	217,1	384,0	0	43	77
	Med	394,4	458,8	476,6	79	92	95

Anledningen till att lastfall 1 och 3 har lägre hållfasthet är avsvalningsfasen. Den höga temperaturen fortsätter då att vandra inåt i betongen trots att det inte sker någon temperaturökning. Detta syns tydligast för det andra armeringslagret.

En förenkling som gjorts är att en konstant E-modul för stålet antagits. Det är inte bara hållfastheten som varierar med temperaturen, utan även E-modulen. Detta kan ses på lutningen av kurvorna i *Figur 25* som visar arbetskurvorna för stålet.

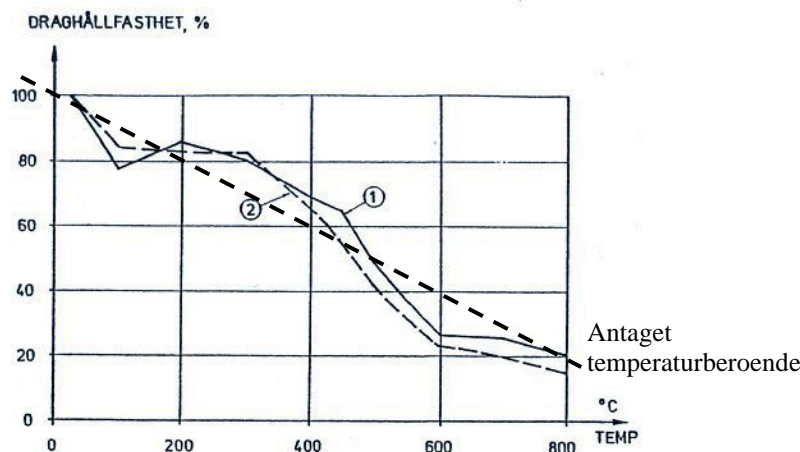
5.2.2 Betong

För tryckt betong drogs en gräns vid 450°C. För betong som har temperaturer under 450°C har hållfastheten inte reducerats, för temperaturer över 450°C anses tryckhållfastheten vara noll enligt ANV0162. I *Figur 28* nedan visas arbetskurvan för tryckt betong vid olika temperaturer. Detta leder till att antagandet är på säker sida.

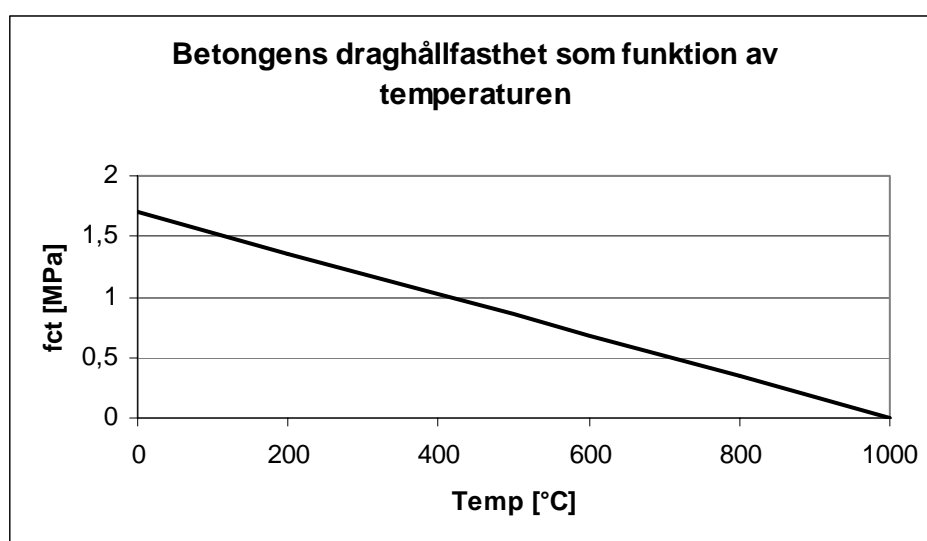


Figur 28: Arbetskurva för tryckt betong [24]

Hur betongens draghållfasthet varierar med temperaturen har beräknats med hjälp av *Figur 29* som visar draghållfasthetens temperaturberoende för betong. På liknande sett som för stålet gjordes en reducering av betongens draghållfasthet och diagrammet enligt *Figur 30* skapades. En förenkling gjordes med antagandet att draghållfastheten varierar linjärt med temperaturen, se *Figur 29*. Kapaciteten antas minska med 20 % för varje temperaturökning på 200°C.



Figur 29: Draghållfasthetens temperaturberoende för betong [24].



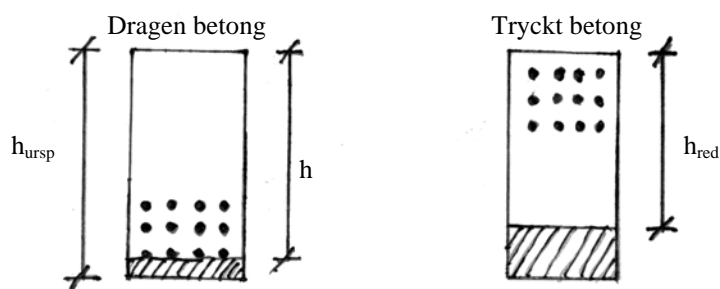
Figur 30: Betongens draghållfasthet som funktion av temperaturen.

5.3 Förenklningar av geometrin

För att beräkningarna inte ska bli för komplicerade har en del förenklningar av geometrin gjorts. För de fall utan isolering antas täckskiktet spjälka bort i tidigt skede och har inte tagits med i beräkningarna. Detta innebär att tvärsnittshöjden h använts, se *Figur 31*. Resultaten från temperaturberäkningarna har därför räknats från det bortspjälkade täckskiktet. Det vill säga de kritiska snitten är beräknade från den kant som blir då täckskiktet är borta.

All betong antas sakna lastupptagningsförmåga vid temperaturer högre än 450°C. För den tryckta betongen har därför tvärsnittshöjden reducerats till h_{red} för de lastfall utan isolering, se *Figur 31*. Höjden har minskats med det kritiska snittet som erhållits från temperaturberäkningarna, se *Tabell 9*.

För de lastfall med isolering har den ursprungliga höjden h_{ursp} använts för både tryckt och dragen betong.



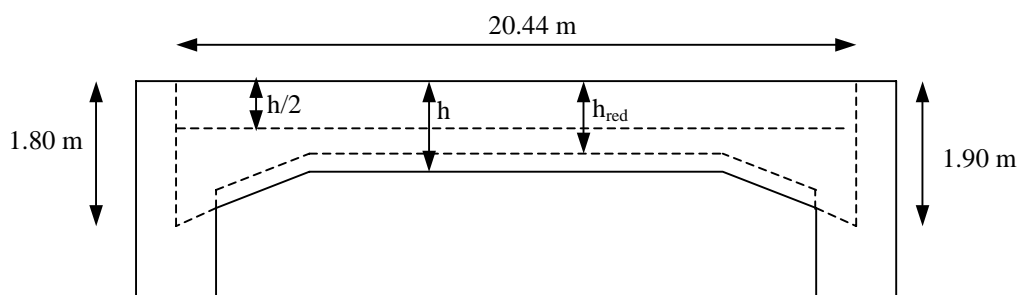
Värme

Figur 31: Höjder som använts i beräkningarna för dragen resp. tryckt betong

Tabell 9: Avstånd från underkant där temperaturen uppnått 450 °C i betongen.

lastfall	1	2	3
x [m]	0,121	0,097	0,130

I Figur 32 kan det tvärsnitt som använts i beräkningarna ses. Den streckade linjen visar den reducerade sektionen. För den del av taket som ligger ovan väggarna antas inte någon betong spjälka bort tack vare att väggen skyddar taket. Därav har två höjder använts för samma z-koordinat, se Tabell 10.



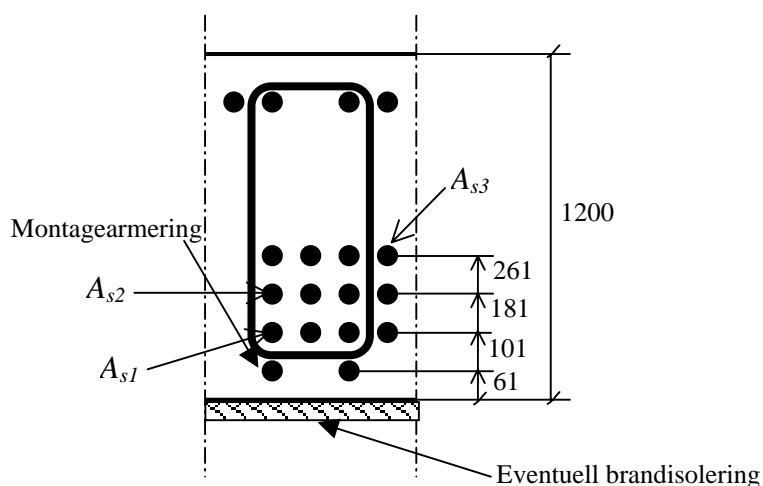
Figur 32: Tvärsnitt som använts i beräkningarna med h och h_{red} inritat, övriga mått se Tabell 10.

Eftersom tvärsnittshöjden varierar har hänsyn ej heller tagits till att normalkraften inte angriper i $h/2$ hela tiden. Vid kontroll av hur mycket resultatet skulle påverkas visade det sig endast utgöra ett fel på 3 % för den största normalkraften. Vid mindre krafter blir därför felet mindre än 3 %.

Tabell 10: Geometri för tvärsnittet som använts i beräkningarna.

	Lastfall 4-6	Lastfall 1	Lastfall 2	Lastfall 3
z [m]	h [m]	h _{red} [m]	h _{red} [m]	h _{red} [m]
0,00	1,80	1,80	1,80	1,80
0,31	1,70	1,70	1,70	1,70
0,31	1,70	1,58	1,60	1,57
1,80	1,20	1,08	1,10	1,07
2,56	1,20	1,08	1,10	1,07
5,11	1,20	1,08	1,10	1,07
7,67	1,20	1,08	1,10	1,07
10,22	1,20	1,08	1,10	1,07
12,78	1,20	1,08	1,10	1,07
15,33	1,20	1,08	1,10	1,07
17,89	1,20	1,08	1,10	1,07
18,33	1,20	1,08	1,10	1,07
19,85	1,70	1,58	1,61	1,57
19,85	1,70	1,70	1,70	1,70
20,44	1,90	1,90	1,90	1,90

I *Figur 33* kan armeringsutformningen ses, det vill säga hur armeringen längs tunnelriktningen antas vara placerad i beräkningarna. Detta är en armeringssammansättning som återkommer varannan meter tvärs tunnelriktningen, som kan ses i *Figur 32*. Beräkningarna är gjorda för en breddmeter, så antalet stänger som ryms i ett lager blir då åtta stycken med en stängdiameter på 32mm. Alla indata kan ses i *Appendix C*.



Figur 33: Armeringsutformning.

6 Dimensionering med avseende på moment

Vid dimensionering med avseende på moment användes MatLab. Programmet i MatLab utformades så att det först görs en preliminär dimensionering där armeringsmängden uppskattas. Därefter görs en mer detaljerad dimensionering där även förankring och avkortning samt förskjutning på grund av sneda sprickor tas hänsyn till. Hur programmet är uppbyggt se *Appendix E*.

6.1 Preliminär dimensionering

I den preliminära dimensioneringen görs först ett antagande att det krävs två fulla lager armering i det utvalda tvärsnittet och därefter görs en uppskattning av erforderlig armeringsmängd för ett tvärsnitt med rektangulär tryckzon. Den inre hävarmen uppskattas till $z \approx 0,9 \cdot d$ och all armering antas flyta, det vill säga $\sigma_s = f_{st}$. Följande formler är hämtade i [25]. Momentkapaciteten uppskattas som:

$$M_d \approx f_{st1} \cdot A_{s1} \cdot 0,9 \cdot d_1 + f_{st2} \cdot A_{s2} \cdot 0,9 \cdot d_2 \quad (1)$$

och ur den fås den erforderliga armeringsarean för det andra lagret

$$A_{s2} \approx \frac{M_d - f_{st1} \cdot A_{s1} \cdot 0,9 \cdot d_1}{f_{st2} \cdot 0,9 \cdot d_2} \quad (2)$$

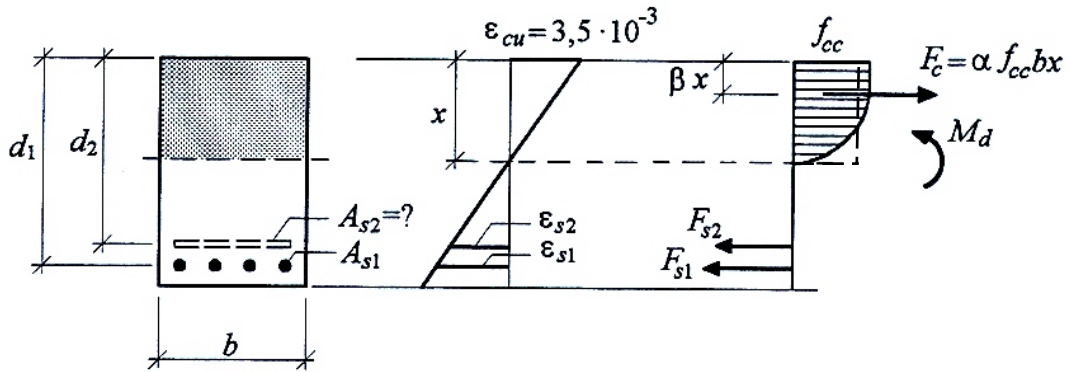
Av detta kan man få tre olika fall. Det första är att termen A_{s2} blir negativ och det innebär att det räcker med ett armeringslager. Det andra fallet inträffar om A_{s2} -termen blir större än armeringsarean för två fulla lager, vilket innebär att det krävs tre armeringslager. Det tredje och sista fallet inträffar när inget av villkoren ovan är uppfyllda, det vill säga att det krävs två lager armering.

6.2 Dimensionering

Från den preliminära dimensionering fås ett okänt armeringslager och mängden armering som krävs beräknas i dimensioneringen. Beroende på hur många armeringslager som behövs fås x , neutrala lagrets läge, från momentekvationen kring det okända lagret. I *Figur 34* visas förutsättningarna för två lager, samma gäller för tre lager lägg dock till en term. För tre lager blir ekvationen:

$$M_d = \alpha \cdot f_{cc} \cdot b \cdot x \cdot (d_3 - \beta \cdot x) - N_d \cdot \left(d_3 - \frac{h}{2} \right) + f_{st2} \cdot A_{s2} \cdot (d_2 - d_3) + f_{st1} \cdot A_{s1} \cdot (d_1 - d_3) \quad (3)$$

Med förenklat, rektangulärt, tryckblock blir $\alpha=0,8$ och $\beta=0,4$.



Figur 34: Beräkningsförutsättningar för armering i två lager rektangulärt tvärsnitt [25]

Med hjälp av x kan töjningen för det okända lagret bestämmas, i detta fall det tredje lagret:

$$\varepsilon_{s3} = \frac{d_3 - x}{x} \cdot \varepsilon_{cu} \quad (4)$$

Blir ε_{s3} större än ε_{sy} så flyter stålet och $\sigma_{s3} = f_{st3}$, det vill säga antagandet är ok. Armeringsarean för det tredje lagret beräknas ur den horisontella projektions-ekvationen:

$$\alpha \cdot f_{cc} \cdot b \cdot x - N_d = f_{st1} \cdot A_{s1} + f_{st2} \cdot A_{s2} + f_{st3} \cdot A_{s3} \quad (5)$$

$$\Rightarrow A_{s3} = \frac{\alpha \cdot f_{cc} \cdot b \cdot x - N_d - f_{st1} \cdot A_{s1} - f_{s2} \cdot A_{s2}}{f_{st3}} \quad (6)$$

6.3 Förankring och avkortning

Förankringslängderna har beräknats enligt BBK 94:

$$l_b = \frac{f_{st}}{f_b} \cdot \frac{\phi}{4} \quad (7)$$

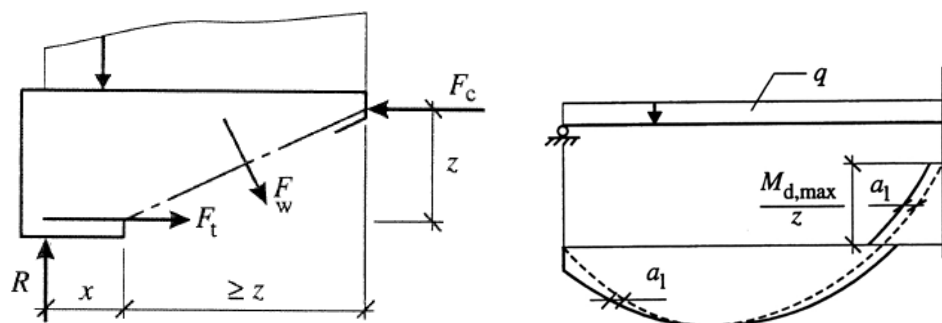
där vidhäftningshållfastheten för kamstänger och profilerade stänger beräknas som:

$$f_b = \eta \cdot \eta_1 \cdot \frac{1}{3} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot c}{\phi}\right) \cdot f_{ct} \quad (8)$$

där $\eta = 1,4$ för kamstänger och $\eta_1 = 0,8$ eller $\eta_1 = 0,7$ (beroende på om armeringen är dragen i underkant eller överkant) med hänsyn till undergjutelsehöjden. Beräkning av c kan ses i *Appendix F*. Förankringslängderna har beräknats för varje armeringslager. På så sätt har temperaturfördelningen tagits hänsyn till, det vill säga reducerade värden på f_{ct} och f_{st} har använts i beräkningarna.

6.4 Förskjutning av kurvor pga sneda sprickor

För att beräkna dragarmeringsbehovet i ett snitt x , måste man ta hänsyn till de sneda sprickor som uppkommer, se *Figur 35*. Dragkraften i betongen som ska överföras till armeringen förskjuts med längden $a_1 = 1,5 \cdot d$.

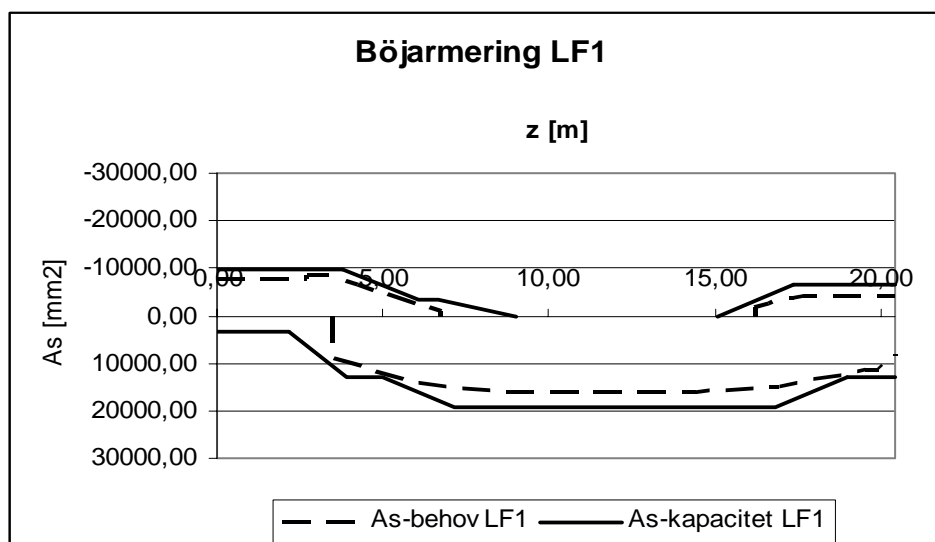


Figur 35: I: Balkdel med angräpningskrafter för bestämning av dragkraften i böjarmeringen i ett snitt x . II: Exempel på dragkraftsvariation vid jämt utbredd last [25].

I *Figur 35* kan även ett exempel på dragkraftsvariation vid jämt utbredd last ses. Den streckade linjen motsvarar dragkraftsvariationen enligt momentdiagrammet utan hänsyn till sneda sprickor och a_1 är dragkraftskurvans förskjutning i just det snittet.

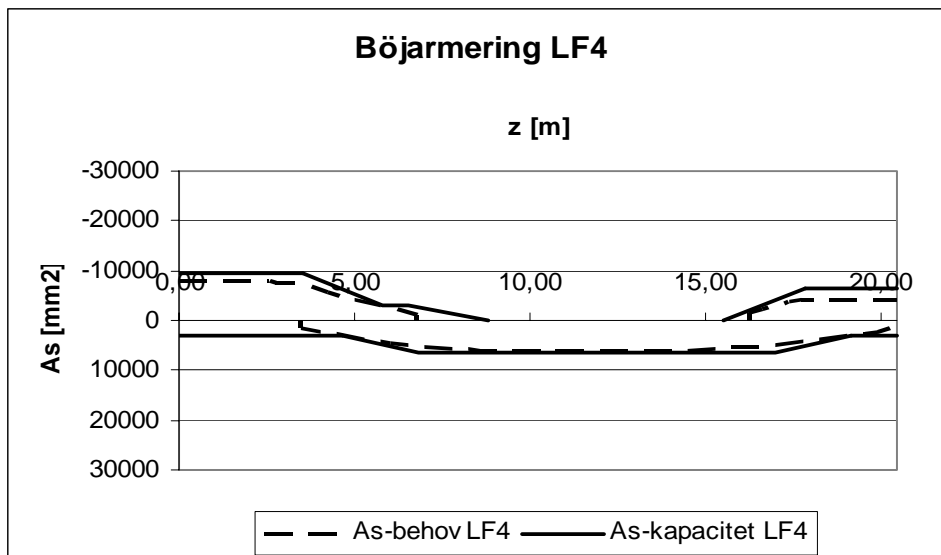
6.5 Resultat

Resultaten visas nedan där lösningarna för minmoment med tillhörande normalkraft är dimensionerande för överkantsarmeringen och maxmoment med tillhörande normalkraft är dimensionerande för underkantsarmeringen.



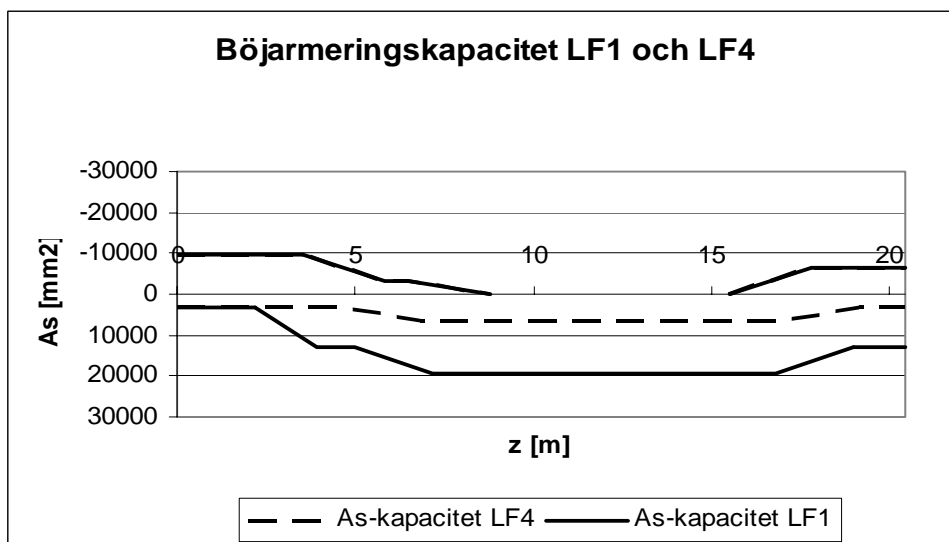
Figur 36: Jämförelse av böjarmeringsbehov och kapacitet lastfall 1 (olycklast brand, Götatunnelkurvan utan isolering).

Med hjälp av de beräknande förankringslängderna och armeringsarean har sedan kapaciteten beräknats och införts i diagram. I *Figur 36* visas böjarmeringsbehovet samt böjarmeringskapaciteten för lastfall 1, Götatunnelkurvan utan isolering olyckslast med avseende på brand. Där är kapaciteten anpassad efter behovet och tillräcklig armering är inlagd, det vill säga att kapaciteten är större än behovet.



Figur 37: Jämförelse av böjarmeringsbehov och kapacitet lastfall 4 (olyckslast brand, Götatunnelkurvan med isolering).

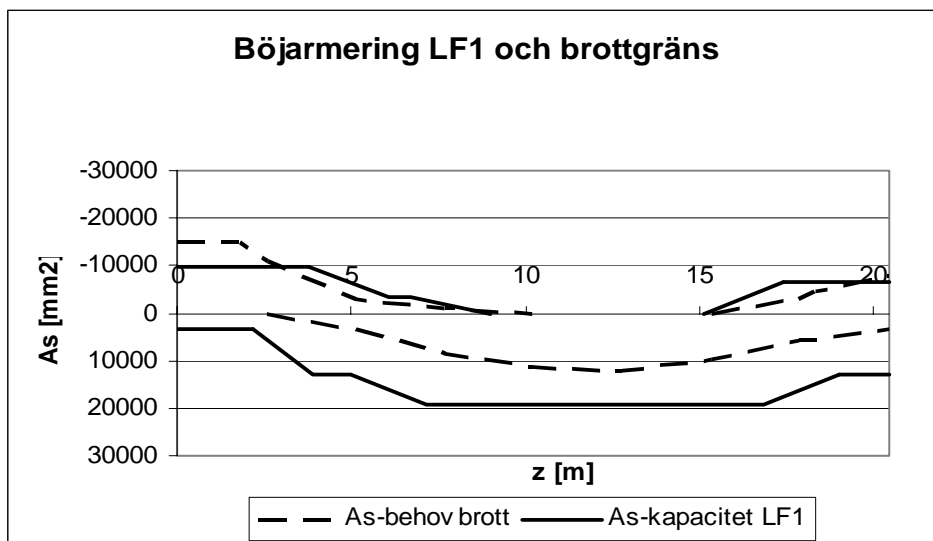
I *Figur 37* visas böjarmeringsbehovet samt böjarmeringskapaciteten för lastfall 4, Götatunnelkurvan med isolering olyckslast med avseende på brand. Även här är kapaciteten anpassad efter behovet och tillräcklig armering är inlagd, det vill säga att kapaciteten är större än behovet.



Figur 38: Jämförelse av böjarmeringskapacitet av lastfall 1 och 4.

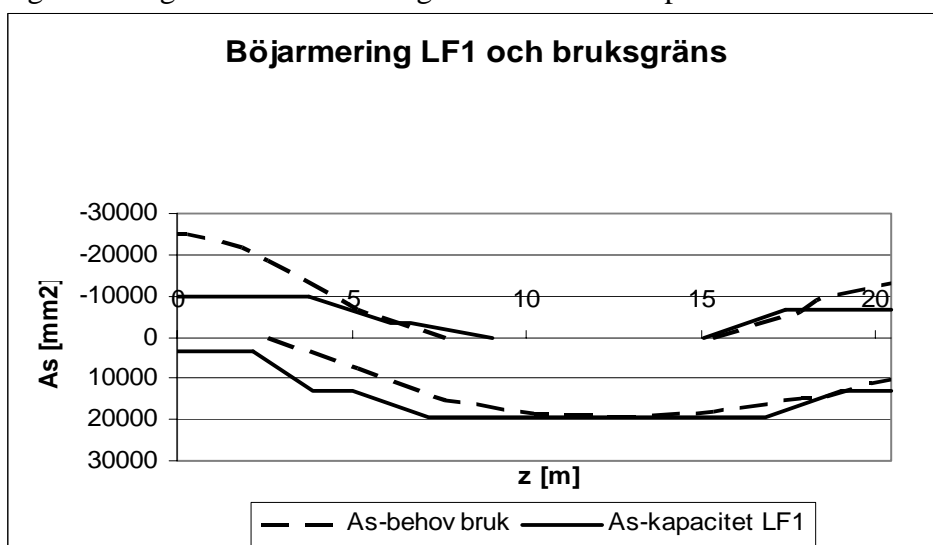
I *Figur 38* visas böjarmeringskapaciteten för lastfall ett och fyra, Götatunnelkurvan utan respektive med isolering. Kapaciteten för överkantsarmeringen blir lika för båda

lastfallen i och med att temperaturen aldrig stiger så högt i den delen av tvärsnittet. För överkantsarmeringen har isoleringen ingen inverkan, även att tvärsnittshöjden reducerats. I underkant skiljer sig dock kapaciteten åt. I det värsta snittet har lastfallet utan isolering mer än dubbelt så stor kapacitet som lastfallet med isolering. Detta beror på att det understa armeringslagret får så hög temperatur att det inte har någon kapacitet alls, utan momentet måste tas upp av armeringen i övriga armeringslager som har kapacitet kvar.



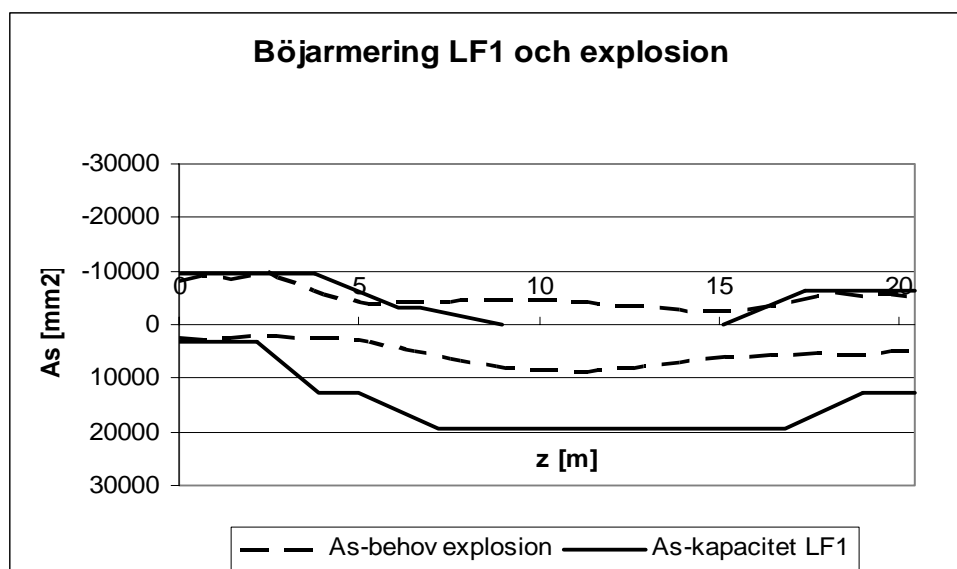
Figur 39: Jämförelse av böjarmeringskapacitet lastfall 1 och böjarmeringsbehov för brottgränstillstånd.

I Figur 39 visas böjarmeringskapaciteten för lastfall 1 (olyckslast map brand, Götatunnelkurvan utan isolering) och behovet för brottgränstillstånd som tagits fram av Reinertsen i beräkningarna för Götatunneln. Man ser att kapaciteten för lastfall ett är betydligt större än behovet i brottgränstillstånd i underkant. I överkant är behovet något högre för brottgräns än kapaciteten för lastfall 1.



Figur 40: Jämförelse av böjarmeringskapacitet lastfall 1 och böjarmeringsbehov för bruksgränstillstånd.

Behovet i bruksgränstillstånd är ungefär lika med kapaciteten för lastfall 1 för underkantsarmeringen. Däremot skiljer sig överkantsarmeringen, vid upplag är behovet dubbelt så stort i bruksgräns jämfört med kapaciteten för lastfall 1. Detta visas i *Figur 40*.



Figur 41: Jämförelse av böjarmeringskapacitet lastfall 1 och böjarmeringsbehov för olyckslast, explosion.

I *Figur 41* visas böjarmeringskapaciteten för lastfall 1 och böjarmeringsbehovet för olyckslast med avseende på explosion. I detta fall blir brand (lastfall 1) dimensionerande.

En slutsats som kan dras är att det är bruksgränstillstånd som är dimensionerande för Götatunneln, samt att tunneln står emot en brand även utan brandisolering. Detta tack vare att det krävs så pass mycket armering för att uppfylla sprickbreddskraven. Detta förutsätter att brandförloppet följer Götatunnelkurvan.

Frågan är vad som skulle hända om tunneln dimensionerats efter Citytunnelkurvan, där högre temperatur uppnås ännu längre in i betongen. Detta leder i sin tur till att kapaciteten i armeringen försämras ytterligare och därmed kanske brand blir dimensionerande i stället för sprickbreddskraven. Dock bör det nämnas att det kommer att finnas brandisolering i Götatunneln och de höga temperaturerna som uppnås utan isoleringen kommer ej att uppnås i detta fall.

7 Framtagning av tvärkraftsarmeringsbehov

Framtagningen av tvärkraftsarmeringsbehovet har gjorts för två lastfall med hjälp av V_d (dimensionerande tvärkraft), V_c (betongens tvärkraftskapacitet) samt inverkan av normalkraft.

7.1 Förutsättningar

Beräkningarna är gjorda för de lastfallen med Götatunnelkurvan (utan och med isolering), det vill säga lastfall 1 och lastfall 4. Samma armeringsmodul som i kapitel 5.3 har studerats för tvärkraftsbehovet. Beräkningarna har gjorts enligt BBK94, då BBK04 kom ut efter att beräkningarna i examensarbetet var slutförda.

7.1.1 Förenklingar

Hänsyn har ej tagits till att betongens draghållfasthet har ett temperaturberoende, utan ett konstant värde har använts. Dock har betongtvärsnittet justerats enligt 5.3.

Inverkan av last nära upplag har ej beaktats.

Inverkan av variabel effektiv höjd har ej heller tagits hänsyn till i beräkningarna, då den större delen av sektionen har konstant effektiv höjd (beroende av armeringen). Detta innebär att V_i -termen nedan i ekvation (9) utesluts.

7.2 Beräkningsgång

Beräkningarna följer beräkningsgången i BBK94 kapitel 3.7.3 och alla formler nedan är tagna därur. Tvärkraftskapaciteten ska uppfylla följande villkor:

$$V_{sd} \leq V_c + V_i + V_s \quad (9)$$

V_{sd} är tvärkraft av dimensioneringslast, V_c är betongens tvärkraftskapacitet, V_i är inverkan av variabel effektiv höjd och V_s är tvärkraftsarmeringens bidrag.

7.2.1 Betongens tvärkraftskapacitet

Betongens tvärkraftskapacitet, V_c , beräknas enligt nedan för en konstruktionsdel med konstant tvärsnitt och ej påverkad av dragkraft.

$$V_c = b_w \cdot d \cdot f_v \quad (10)$$

där betongens formella skjuvhållfasthet är:

$$f_v = \xi \cdot (1 + 50 \cdot \rho) \cdot 0,30 \cdot f_{ct} \quad (11)$$

För att kunna beräkna V_c och ξ beräknades ett medelvärde för den effektiva höjden för varje tvärsnitt. Den effektiva höjden av tvärsnittet är beroende av temperaturen då

antalet stänger i varje lager har reducerats beroende på temperaturbelastningarna. ξ beräknas sen genom:

$$\xi = 1,3 - 0,4 \cdot d \quad \text{för } 0,5m < d \leq 1,0m$$

$$\xi = 0,9 \quad \text{för } 1,0m < d$$

Att dessa två kriterier valts ut beror på att ingen av de effektiva höjderna är mindre än 0,5 m. Dock behöver ξ aldrig sättas lägre än 1,0 där det finns byglar.

$$\rho = \frac{A_{s0}}{b_w \cdot d} \quad \text{dock högst } 0,02$$

ρ är även den beroende av temperaturen genom A_{s0} som är den minsta böjarmeringsarea i dragzonen i betraktad del mellan momentets nollpunkt och dess maximipunkt. Då A_{s0} varierar för varje beräkningssnitt är detta en förenkling. Som kan ses i *Figur 36* finns det områden där betongen är "både" tryckt och dragen. I dessa fall har den minsta mängden armering utav den tryckta respektive den dragna delen använts.

7.2.2 Inverkan av normalkraft

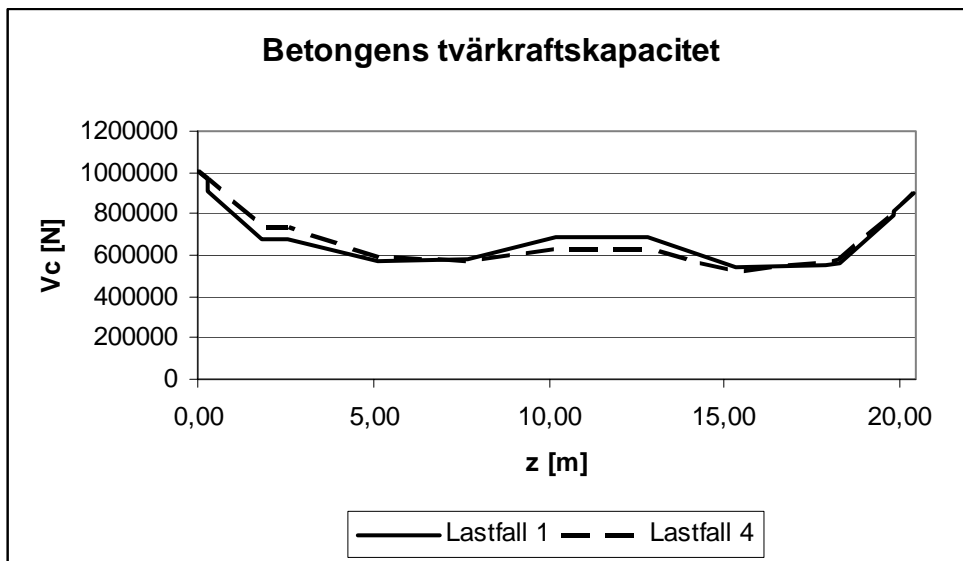
Då normalkraften är tryckt har den en gynnsam inverkan på tvärkraftskapaciteten och har därför inte beaktats i beräkningarna. Om normalkraften däremot är dragen så minskar tvärkraftskapaciteten och grundkapaciteten V_c minskas med:

$$V_p = 0,1 \cdot N_d \quad (12)$$

dock ej till lägre värde än noll.

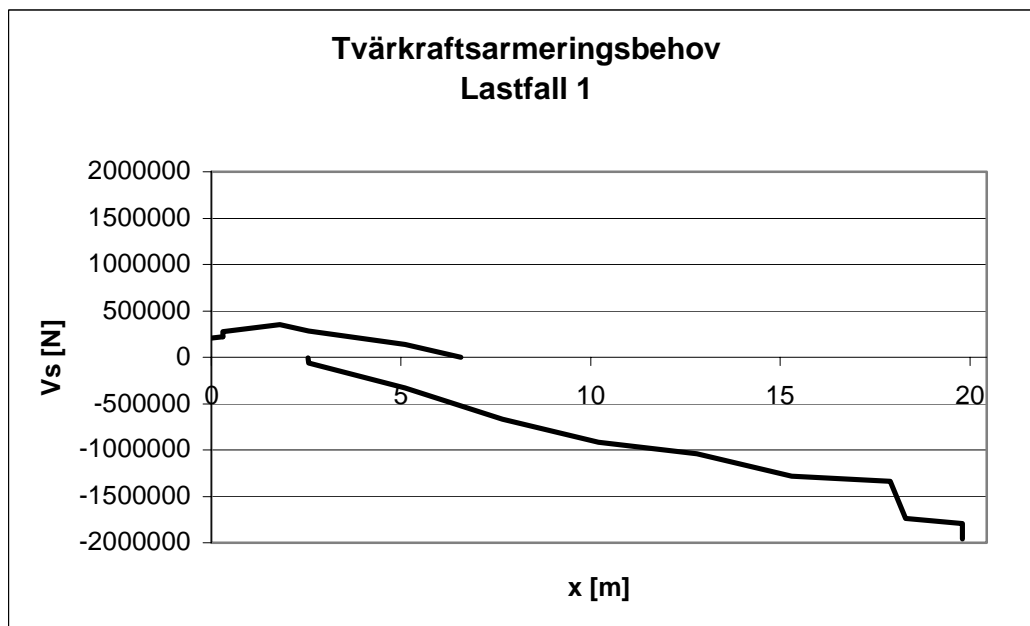
7.3 Resultat

Resultaten visar behovet längs med en tvärsektion av tunneln. Hänsyn har ej tagits till temperaturvariationen i byglarna, då detta skulle göra beräkningarna alltför komplicerade. I *Figur 42* visas betongens tvärkraftskapacitet för lastfall 1, Götatunnelkurvan utan isolering, och lastfall 4, Götatunnelkurvan med isolering. Skillnaden mellan kurvorna är inte så stor, detta på grund av förenklingarna. Betongens draghållfasthet har antagits ett konstant värde för båda lastfallen och är inte temperaturberoende.

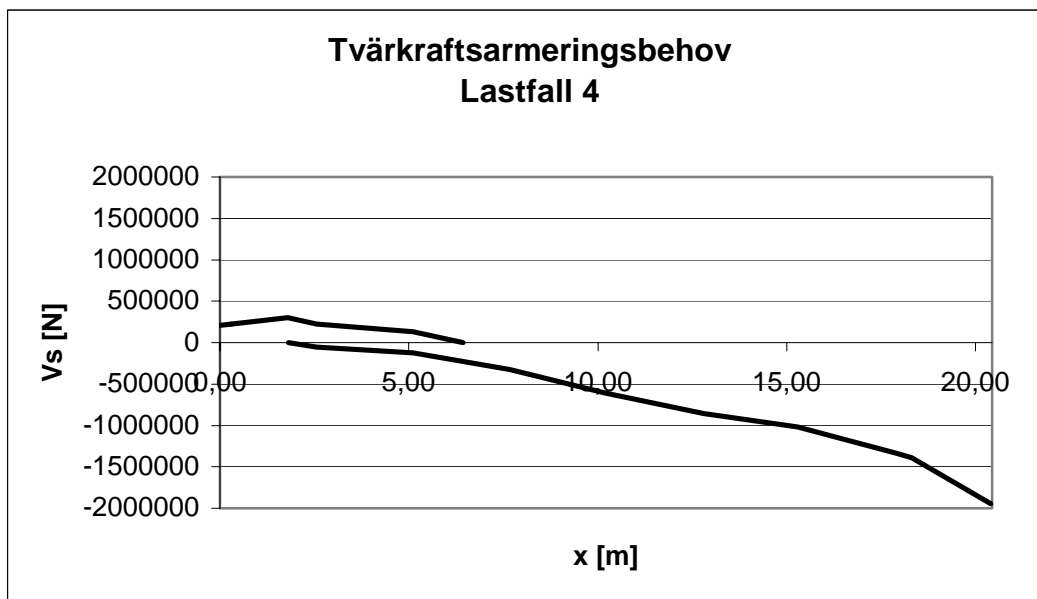


Figur 42: Betongens tvärkraftskapacitet, Götatunnelkurvan utan (lastfall 1) resp. med isolering (lastfall 4)

Som kan ses i Figur 43 och Figur 44 är det inte så stor skillnad mellan lastfallen med och utan isolering. Detta beror på att hänsyn inte tagits till just temperaturen och att behovet blir då ungefär lika.

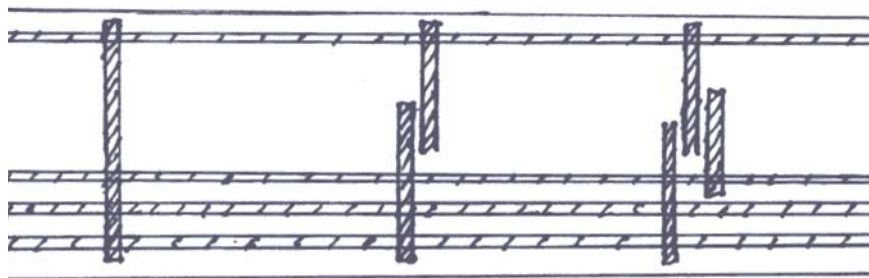


Figur 43: Tvärkraftsarmeringsbehov för lastfall 1, Götatunnelkurvan utan isolering.



Figur 44: Tvärkraftsarmeringsbehov för lastfall 4, Götatunnelkurvan med isolering.

Ett stort problem vid brand är tvärkraftsarmeringen då den blir mer eller mindre överksam på grund av bygelns utformning. I Figur 45 visas tre exempel på hur byglarna kan vara utformade.



Figur 45: Byglars utformning, tre olika alternativ.

Den bygel längst till vänster i Figur 45 används oftast i de flesta konstruktioner. Problemet med denna utformning är att om det nedersta böjarmeringslagret inte har någon kapacitet kvar på grund av de höga temperaturerna, så förlorar även den nedre delen av bygel all sin kapacitet och därmed bidrar inte bygel till någon större lastupptagning.

Den bygelutformning som är i mitten i Figur 45 används oftast i tunnlar och broar. Man delar på bygel för att underlätta vid montage av armeringen. Även i detta fall förlorar den nedre delen av bygel större delen av sin kapacitet och även här är bygel mer eller mindre överksam.

Den tredje utformningen (längst till höger) av byglarna i Figur 45 är ett exempel på hur man ska kunna lösa problemet som uppkommer vid höga temperaturer. Då den nedersta delen av bygel förlorar sin kapacitet kommer den mellersta bygel och tar över. I och med att den är placerad längre upp i tvärsnittet når inte värmen lika höga temperaturer här och bygel har stor del av sin bärförmåga kvar.

8 Diskussion och slutsatser

En slutsats är att brandisoleringen som finns i Götatunneln minskar risken för spjälkning samt kollaps av tunneltaket. Detta underlättar även för Räddningstjänsten då de inte behöver vara rädda för att stora delar av taket ska rasa in då de bekämpar branden. Rekommendationen blir därför att alltid brandisolera tunnlar och bygg minst två tunnelrör med trafiken enkelriktad i respektive rör. Ett annat alternativ för att minska risken för spjälkning är att blanda in polypropylenfibrer i betongen. Allt detta för att öka säkerheten i tunneln.

Götaunneln ska vid en brandbelastning kunna motstå 300 MW med en varaktighet på 120 minuter och temperaturen på betongytan ska inte överstiga 300°C, vilket motsvaras av RWS-kurvan med brandisolering. Transporter med farligt gods är ej tillåtna i centrala Göteborg och därmed ej heller genom tunneln [16]. Enligt uppgifter på Södra länkens hemsida [27] ska tunnlarna i Södra länken¹⁰ kunna motstå en brand med en intensitet på 100 MW och temperaturen på betongytan ska inte överskrida 450°C. Vid transporter med farligt gods kommer åtgärder att vidtas för att garantera säkerheten. Omkörningsförbud kommer att gälla för tunga transporter. Gods som är högklassat får endast trafikera tunneln mellan kl. 19.00 och 07.00. För Citytunneln kommer tåg med farligt gods liksom dieseldrivna tåg inte tillåtas [28]. Dessa värden är relativt låga om man tar hänsyn till de olyckor som skett hittills, jämför med *Tabell 1*, och uppmätta värden i nyligen gjorda tunnelförsök.

I november 2003 hölls en konferens i Borås, Catastrophic Tunnel Fires International Symposium, som handlade om bland annat fullskaleförsöken som hållits under hösten i Runehammartunneln i Norge. Dessa försök är ett led i utvecklingen där EU-kommissionen velat påskynda utvecklingen och har därmed startat ett antal olika projekt för att öka brandsäkerheten i tunnlar. De mest omtalade är idag FIT¹¹ och Uptun¹². Avsikten är att skapa konsultativa databaser genom insamling av data om tunnelkaraktäristiska, olyckor i befintliga tunnlar, olika länders riktlinjer samt ge riktlinjer för att uppgradera säkerheten i befintliga tunnlar och utveckla säkerhetskoncept för nya tunnlar [3].

Syftet med försöken i Runehammartunneln var att se brandutvecklingen och brandutvecklingshastigheten, hur brandgasventilation påverkar brandförloppet, brandspridning mellan fordon och hur temperaturfördelningen är i tunnelns innertak. Försöken har gjorts i en nedlagd vägtunnel där man använt olika sorters laster se *Tabell 11*.

¹⁰ Motortrafikled som förbinder Essingeleden och Värmdöleden i Stockholm

¹¹ Fire In Tunnels

¹² Upgrading Fire Safety in Existing Tunnels

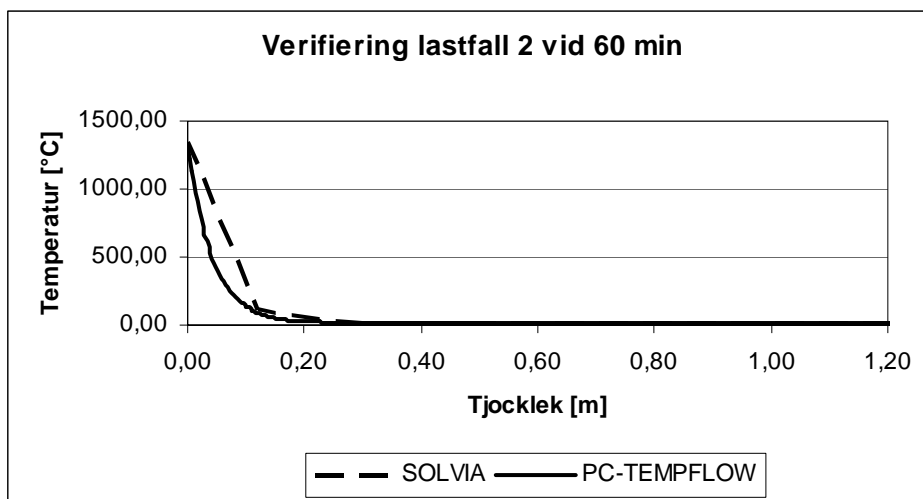
Tabell 11: Olika brandlaster vid fullskaleförsöken i Runehammartunneln i Norge [5].

Last [ton]	Plasthalt [%]	Övrigt innehåll	Motsvarar
9,9	18	-	-
2,6	19	-	Plastkoppar i kartonger
7,7	18	0,8 ton däck	Lastbil lastad med möbler

För några av dessa laster nåddes lika höga temperaturer som RWS-kurvan motsvarar, det vill säga 1 350°C. Tilläggs bör då att RWS-kurvan ska simulera en brandlast med farligt gods. Detta innebär att de flesta tunnlar dimensioneras idag med för låga brandlaster, då det inte alltid är RWS-kurvan som används vid dimensionering, utan andra brandkurvor som har lägre maxtemperaturer till exempel ISO-kurvan, se *Figur 1*.

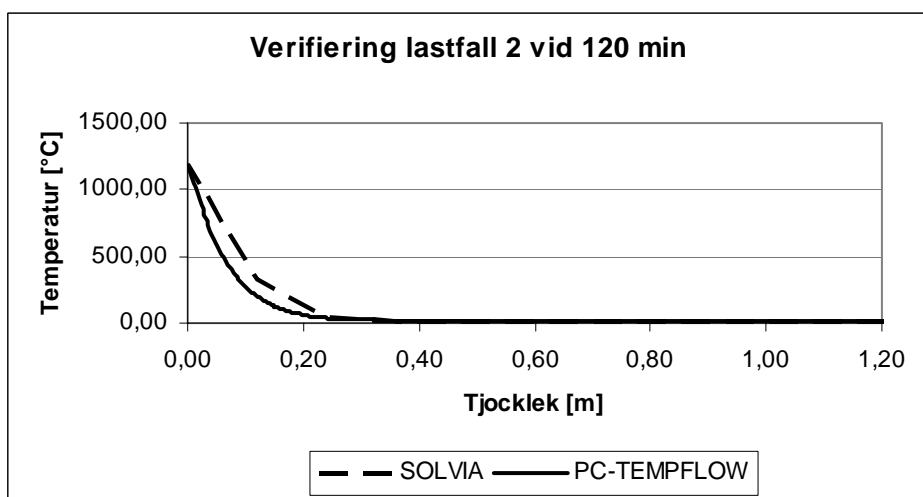
De tid-temperaturkurvor som valts ut vid beräkningarna är RWS-kurvan, Götatunnelkurvan och Citytunnelkurvan. Att RWS-kurvan valts ut beror på att Götatunneln ska motstå en brand motsvarande RWS-kurvan, Götatunnelkurvan för att tunneln är dimensionerad efter den och Citytunnelkurvan för att den har det mest realistiska brandförloppet med en snabb uppvärmning och långsam avsvälning. Det har visat sig att avsvälningen har stor betydelse för temperaturfördelningen. Trots att ingen brandlast appliceras under avsvälningssfasen fortsätter ändå värmen att vandra inåt i betongen, Citytunnelkurvan har dessutom en längre avsvälningssfas än Götatunnelkurvan, vilket påverkar möjligheten för temperaturen att fortsätta vandra inåt i betongen. För de kurvor med avsvälning kan man tydligt se att maxtemperaturen i det andra armeringslagret inträffar i slutskedet av tid-temperaturkurvan, medan för RWS-kurvan strax efter maxtemperaturen uppnåts i belastningsfallet. Brandisoleringens effekt är också avgörande, endast tre centimeter tjock isolering reducerar temperaturen med ca 1 000 °C för alla tre tid-temperaturkurvorna.

För att få någon form av verifiering av resultaten från SOLVIA har brandtemperaturprogrammet PC-TempFlow använts. Det lastfall som studerats för verifiering är RWS-kurvan utan isolering (lastfall 2), då denna kurva finns förinlagd i PC-TempFlow. De andra lastfallen har inte verifierats. I *Figur 46* visas resultaten från de båda programmen vid tidpunkten 60 minuter efter att branden startat.



Figur 46: Jämförelse av lastfall 2 från SOLVIA och PC-TempFlow vid tiden 60 minuter.

Kurvan från PC-TempFlow har en lägre temperatur och mjukare form. Detta beror till stor del på att antalet punkter, som temperaturen har beräknats i är betydligt färre i SOLVIA-beräkningen jämfört med antalet i PC-TempFlow. I SOLVIA har punkter var tolfte centimeter använts, medan i PC-TempFlow har punkter var tredje millimeter använts. Detta leder till att dimensioneringen har gjorts med för höga temperaturer, det vill säga värre än de egentligen är. För att förhindra denna skillnad kan man välja en mindre mesh i SOLVIA, det vill säga fler element som troligtvis kommer att ge en jämnare och mer korrekt temperaturfördelning. I Figur 47 visas hur temperaturen varierar vid tidpunkten 120 minuter efter branden startat för de olika programmen.



Figur 47: Jämförelse av lastfall 2 från SOLVIA och PC-TempFlow vid tiden 120 minuter.

Med tanke på hur resultaten blev så kan man konstatera att det behövs ingen brandisolering för böjarmeringen i Götatunneln. Den armering som är dimensionerad att klara bruksgränstillståndet klarar även den brandbelastning som sker vid en brand.

Kapaciteten för överkantsarmeringen i lastfall 1 och 4 (Götatunnelkurvan utan och med brandisolering) blir lika för båda lastfallen i och med att temperaturen aldrig stiger så högt i den delen av tvärsnittet. För överkantsarmeringen har isoleringen ingen inverkan, även att tvärsnittshöjden reducerats. I underkant skiljer sig dock kapaciteten åt. I det värsta snittet har lastfallet utan isolering mer än dubbelt så stor kapacitet som lastfallet med isolering. Detta beror på att det understa armeringslagret får så hög temperatur att det inte har någon kapacitet alls, utan momentet måste tas upp av armeringen i övriga armeringslager som har kapacitet kvar.

Ett stort problem vid brand är tvärkraftsarmeringen då den blir mer eller mindre överksam på grund av bygelns utformning. Den bygel som används i de flesta konstruktioner samt den som används i broar och tunnlar innebär ett problem med utformningen. Då det nedersta böjarmeringslagret inte har någon kapacitet kvar på grund av de höga temperaturerna, så förlorar även den nedre delen av bygeln all sin kapacitet och därmed bidrar inte bygeln till någon större lastupptagning. För att lösa detta problem bör man dela upp bygeln i tre delar enligt *Figur 45*. Då den nedersta delen av bygeln förlorar sin kapacitet kommer den mellersta bygeln och tar över. I och med att den är placerad längre upp i tvärsnittet når inte värmen lika höga temperaturer här och bygeln har stor del av sin bärförmåga kvar. Anledningen till att det inte är så stor skillnad mellan lastfallen med och utan isolering är att detta beror på att hänsyn inte tagits till just temperaturen och att behovet blir då ungefär lika. Huruvida tvärkraftsarmeringen klarar sig är lite oklart. Troligtvis hade den inte klarat en brand utan brandisolering.

Konsekvenserna kan dock bli större vid en brand om tunneln ej är isolerad. Ta till exempel Eurotunneln där reparationskostnaderna blev mycket stora. När Eurotunneln reparerades gjorde man inget för att brandskydda den för att förhindra en liknande katastrof med motiveringen att risken att det händer är så liten. Det var även risk för kollaps vid branden, men tunneln klarade sig tack vare att berggrunden var så pass stabil just där olyckan skedde. Hade olyckan inträffat några kilometer tidigare så hade tunneln kollapsat på grund av att berggrunden var så skör och vattengenomsläpplig och konsekvenserna hade blivit ödesdigra. Slutsatsen blir därför: brandisolera alltid, även om konstruktionen i sig klarar av att motstå en brand. Detta underlättar för räddningstjänst och evakuering samt vid reparation av tunneln om en brand skulle inträffa. Det är betydligt enklare att byta ut isoleringen än att ersätta den armering och betong som förlorats i branden.

Förslag till framtida arbete är att studera närmare vad som händer med armeringen vid de övriga fyra lastfallen, det vill säga RWS-kurvan och Citytunnelkurvan med och utan isolering, samt en mer ingående analys av den lite mer komplicerade tvärkraftsarmeringen. Då temperaturen i bygeln varierar är det svårt att bestämma materialegenskaperna för den. Eftersom det har kommit nya standarder i form av BBK04 sedan beräkningarna i examensarbetet gjordes, vore det mer intressant att se hur tvärkraftsarmeringen påverkas av detta. Man kan även göra temperaturberäkningarna lite mer ingående, samt ändra på indata och se vad det får för följder för temperaturfördelningen.

9 Referenser

- [1] Ljung, S. (2003): Provnings & Forskning. Storskaliga brandförsök ska göra tunnlar säkrare, Nr. 3, 2003
- [2] Fielding, L. (2003): Fire Suppression in road tunnels – Why it is needed! A fire brigade view, International Symposium on Catastrophic Tunnel Fires (CTF), Borås, 2003
- [3] Anderberg, Y., Norén, A. (2003): Bygg & Teknik. Brandsäkerhet i Europas tunnlar, Årgång 95, Nr. 6, september 2003, sid. 38-42.
- [4] Anderberg, Y. (2000): Betong. Kan betonginklädda tunnlar motstå brand?, Nr. 1, 2000, sid. 12-14
- [5] Ingasson, H. (2003): Fire Development in Catastrophic Tunnel Fires (CTF), International Symposium on Catastrophic Tunnel Fires (CTF), Borås, 2003
- [6] Ingasson, H., Bengtsson, S., Hiort, F. (1998): Brand och brandskydd i undermarksanläggningar, SP Brandteknik, SP RAPPORT 1997:41, Borås, 1998
- [7] Ingasson, H. (2000): Dimensionering av tunnlar - brandaspekter, SP Brandteknik, P009559
- [8] Der Österreichische Brandschutzkatalog 2003, Baulicher Brandschutz, Brandschutz in Tunnelbauwerken und unterirdischen Verkehrsanlagen, www.brandschutz.at
- [9] Vägverket, Avdelningen för bro och tunnel (1999), Allmän teknisk beskrivning för vägtunnlar, Tunnel 99, VV Publ 1999:138
- [10] BV TUNNEL (Banverkets anvisningar om tunnelkonstruktioner)
- [11] <http://www.promat-tunnel.com/idprt001.htm> 2004-04-26
- [12] Kieksi, K. (2003): Betong. Brandprovning av betongelement för Citytunneln i Malmö, Nr.4, december 2003, sid. 21-23
- [13] Khoury, G.A. (2000): Effect of fire on concrete and concrete structures, Imperial Collage, Prog. Struct. Engng Mater. 2000; 2:429-447, London, 2000
- [14] AB Svensk byggtjänst, (1994): Betonghandbok material, utgåva 2, AB Svensk Byggtjänst och Cementa AB, Stockholm 1994
- [15] Vägverket, (1995): ANV 0162 Branddimensionering av betongtunnlar, Vägverket, 1995
- [16] <http://www3.vv.se/gotaleden/Default.asp> 2004-06-13
- [17] SOLVIA (1999): SOLVIA-PRE 99.0, Users Manual, Report SE 99-1, SOLVIA ENGINEERING AB, Västerås 1999

- [18] SOLVIA (1999): SOLVIA-POST 95.0, Users Manual, Report SE 95-2, SOLVIA ENGINEERING AB, Västerås 1995
- [19] Pärt-Enander E., Sjöberg, A. (1998): Användarhandledning för MatLab 5, Uppsala universitet, Stockholm 1999
- [20] STRIPSTEP: ELU KONSULT AB, Danderyd 1992
- [21] Hagentoft, C-E. (2001): Introduction to Building Physics, Studentlitteratur, Lund, 2001
- [22] Promat, (2003): Promatect-T for Tunnel Applications (faktablad), Promat UK Limited, 2003
- [23] Boverket, (1994): Boverkets handbok om betongkonstruktioner, Boverket byggavdelningen, Stockholm 1998
- [24] Anderberg, Y., Pettersson, O. (1992): Brandteknisk dimensionering av betongkonstruktioner, Del I, Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm, 1992
- [25] Engström, B. (1994): Beräkning av betong- och murverkskonstruktioner, Del II- Beräkningsmodeller, Institutionen för konstruktionsteknik, Göteborg 2004-Reviderat 2001
- [26] <http://home.wanadoo.nl/wolsink>
- [27] <http://www.sodralanken.nu/> 2005-10-15
(<http://www.sodralanken.nu/sodralanken/om/tunnelsakerhet.shtml>)
(http://www.sodralanken.nu/sodralanken/miljoteknik/tunnel_betong.shtml)
- [28] <http://www.citytunneln.com> 2004-06-13

Appendix

Appendix A: Indatafiler till SOLVIA

Appendix B: Beräkning av det kritiska snittet x

Appendix C: Indata till programmet

Appendix D: Beräkning av c

Appendix E: Programmet

Appendix F: Funktionsfiler till programmet

Appendix G: Handberäkningar


```

function [z,h,d1,d2,d3,d1prim,d2prim,d3prim]=geomediso(fp1)
%-----
% Funktion som läser in indata för geometrin för ett isolerat
% tvärsnitt (ej reducerat)
%
% Input:
% fp1      kommer från en öppen textfil som programmet läser från
%
% Output:
% z        z-koord för de snitt som ska beräknas
% h        höjd på tvärsnittet i de snitt som ska beräknas
% d1       avstånd från ök till det understa armeringslagret
% d2       avstånd från ök till det näst understa
%          armeringslagret
% d3       avstånd från ök till det tredje understa
%          armeringslagret
% d1prim   avstånd från uk till det översta armeringslagret
% d2prim   avstånd från uk till det näst översta armeringslagret
% d3prim   avstånd från uk till det tredje översta
%          armeringslagret
%-----

z=zeros(15,1);
[z]=fscanf(fp1, '%E',[1,15]);
z=z';

h=zeros(15,1);
[h]=fscanf(fp1, '%E',[1,15]);
h=h';

d1=zeros(15,1);
[d1]=fscanf(fp1, '%E',[1,15]);
d1=d1';

d2=zeros(15,1);
[d2]=fscanf(fp1, '%E',[1,15]);
d2=d2';

d3=zeros(15,1);
[d3]=fscanf(fp1, '%E',[1,15]);
d3=d3';

d1prim=zeros(15,1);
[d1prim]=fscanf(fp1, '%E',[1,15]);
d1prim=d1prim';

d2prim=zeros(15,1);
[d2prim]=fscanf(fp1, '%E',[1,15]);
d2prim=d2prim';

d3prim=zeros(15,1);
[d3prim]=fscanf(fp1, '%E',[1,15]);
d3prim=d3prim';

```

APPENDIX F 2 (23)

```
function [z,h,d1,d2,d3,d1prim,d2prim,d3prim]=geoutaniso(fp2,lf)
%-----
% Funktion som läser in indata för geometrin för ett oisolerat
% tvärsnitt (reducerat)
%
% Input:
% fp2      kommer från en öppen textfil som programmet läser från
%
% Output:
% z        z-koord för de snitt som ska beräknas
% h        höjd på tvärsnittet i de snitt som ska beräknas
% d1       avstånd från ök till det understa armeringslagret
% d2       avstånd från ök till det näst understa
%          armeringslagret
% d3       avstånd från ök till det tredje understa
%          armeringslagret
% d1prim   avstånd från uk till det översta armeringslagret
% d2prim   avstånd från uk till det näst översta armeringslagret
% d3prim   avstånd från uk till det tredje översta
%          armeringslagret
%-----

z=zeros(15,1);
[z]=fscanf(fp2, '%E',[1,15]);
z=z';

h=zeros(15,1);
[h]=fscanf(fp2, '%E',[1,15]);
h=h';

hred1=zeros(15,1);
[hred1]=fscanf(fp2, '%E',[1,15]);
hred1=hred1';

hred2=zeros(15,1);
[hred2]=fscanf(fp2, '%E',[1,15]);
hred2=hred2';

hred3=zeros(15,1);
[hred3]=fscanf(fp2, '%E',[1,15]);
hred3=hred3';

d1=zeros(15,1);
[d1]=fscanf(fp2, '%E',[1,15]);
d1=d1';

d2=zeros(15,1);
[d2]=fscanf(fp2, '%E',[1,15]);
d2=d2';

d3=zeros(15,1);
[d3]=fscanf(fp2, '%E',[1,15]);
d3=d3';

d1prim1=zeros(15,1);
[d1prim1]=fscanf(fp2, '%E',[1,15]);
d1prim1=d1prim1';

d2prim1=zeros(15,1);
[d2prim1]=fscanf(fp2, '%E',[1,15]);
d2prim1=d2prim1';
```

```
d3prim1=zeros(15,1);
[d3prim1]=fscanf(fp2, '%E',[1,15]);
d3prim1=d3prim1';

d1prim2=zeros(15,1);
[d1prim2]=fscanf(fp2, '%E',[1,15]);
d1prim2=d1prim2';

d2prim2=zeros(15,1);
[d2prim2]=fscanf(fp2, '%E',[1,15]);
d2prim2=d2prim2';

d3prim2=zeros(15,1);
[d3prim2]=fscanf(fp2, '%E',[1,15]);
d3prim2=d3prim2';

d1prim3=zeros(15,1);
[d1prim3]=fscanf(fp2, '%E',[1,15]);
d1prim3=d1prim3';

d2prim3=zeros(15,1);
[d2prim3]=fscanf(fp2, '%E',[1,15]);
d2prim3=d2prim3';

d3prim3=zeros(15,1);
[d3prim3]=fscanf(fp2, '%E',[1,15]);
d3prim3=d3prim3';

if lf==1
    h=hred1;
    d1prim=d1prim1;
    d2prim=d2prim1;
    d3prim=d3prim1;
elseif lf==2
    h=hred2;
    d1prim=d1prim2;
    d2prim=d2prim2;
    d3prim=d3prim2;
elseif lf==3
    h=hred3;
    d1prim=d1prim3;
    d2prim=d2prim3;
    d3prim=d3prim3;
end
```

APPENDIX F 4 (23)

```
function [Mmax,Ntillhmax,Mmin,Ntillhmin]=MoN(fp3)
%-----
% Funktion som läser in indata för snittlaster
%
% Input:
%   fp3           kommer från en öppen textfil som programmet läser
%                 från
%
% Output:
%   Mmax          Maxmoment för varje snitt
%   Ntillhmax     Normalkraft som tillhör maxmomentet
%   Mmin          Minmoment för varje snitt
%   Ntillhmin     Normalkraft som tillhör minmomentet
%-----

Mmax=zeros(15,1);
[Mmax]=fscanf(fp3, '%E',[1,15]);
Mmax=Mmax'*10^3;

Ntillhmax=zeros(15,1);
[Ntillhmax]=fscanf(fp3, '%E',[1,15]);
Ntillhmax=Ntillhmax'*10^3;

Mmin=zeros(15,1);
[Mmin]=fscanf(fp3, '%E',[1,15]);
Mmin=Mmin'*10^3;

Ntillhmin=zeros(15,1);
[Ntillhmin]=fscanf(fp3, '%E',[1,15]);
Ntillhmin=Ntillhmin'*10^3;
```

```
function [fst]=fstin(fp4, lf)
%-----
% Funktion som läser in indata för stålhållfastheten för varje
% lastfall samt för varje armeringslager
%
% Input:
%   fp4      kommer från en öppen textfil som programmet läser från
%   lf       lastfall (1-6)
%
% Output:
%   fst      fst för det aktuella lastfallet för varje armeringslager
%-----

fst_fall1=zeros(1,3);
[fst_fall1]=fscanf(fp4, '%E',[1,3]);
fst_fall1=fst_fall1'*10^6;

fst_fall4=zeros(1,3);
[fst_fall4]=fscanf(fp4, '%E',[1,3]);
fst_fall4=fst_fall4'*10^6;

fst_fall2=zeros(1,3);
[fst_fall2]=fscanf(fp4, '%E',[1,3]);
fst_fall2=fst_fall2'*10^6;

fst_fall5=zeros(1,3);
[fst_fall5]=fscanf(fp4, '%E',[1,3]);
fst_fall5=fst_fall5'*10^6;

fst_fall3=zeros(1,3);
[fst_fall3]=fscanf(fp4, '%E',[1,3]);
fst_fall3=fst_fall3'*10^6;

fst_fall6=zeros(1,3);
[fst_fall6]=fscanf(fp4, '%E',[1,3]);
fst_fall6=fst_fall6'*10^6;

if lf==1
    fst=fst_fall1;
elseif lf==2
    fst=fst_fall2;
elseif lf==3
    fst=fst_fall3;
elseif lf==4
    fst=fst_fall4;
elseif lf==5
    fst=fst_fall5;
else
    fst=fst_fall6;
end
```

APPENDIX F 6 (23)

```
function [fct]=fctin(fp5,lf)
%-----
% Funktion som läser in indata för fct för varje lastfall samt för
% varje armeringslager
%
% Input:
%   fp5   kommer från en öppen textfil som programmet läser från
%   lf    lastfall (1-6)
%
% Output:
%   fct   fst för det aktuella lastfallet för varje armeringslager
%-----

fct_fall1=zeros(1,3);
[fct_fall1]=fscanf(fp5, '%E',[1,3]);
fct_fall1=fct_fall1'*10^6;

fct_fall4=zeros(1,3);
[fct_fall4]=fscanf(fp5, '%E',[1,3]);
fct_fall4=fct_fall4'*10^6;

fct_fall2=zeros(1,3);
[fct_fall2]=fscanf(fp5, '%E',[1,3]);
fct_fall2=fct_fall2'*10^6;

fct_fall5=zeros(1,3);
[fct_fall5]=fscanf(fp5, '%E',[1,3]);
fct_fall5=fct_fall5'*10^6;

fct_fall3=zeros(1,3);
[fct_fall3]=fscanf(fp5, '%E',[1,3]);
fct_fall3=fct_fall3'*10^6;

fct_fall6=zeros(1,3);
[fct_fall6]=fscanf(fp5, '%E',[1,3]);
fct_fall6=fct_fall6'*10^6;

if lf==1
    fct=fct_fall1;
elseif lf==2
    fct=fct_fall2;
elseif lf==3
    fct=fct_fall3;
elseif lf==4
    fct=fct_fall4;
elseif lf==5
    fct=fct_fall5;
else
    fct=fct_fall6;
end
```

```

function [xmaxi,xmini,antlagermaxi,antlagermini]=xberdragotryck...
    (fcc,b,d1,d2,d3,h,d1prim,d2prim,d3prim,fst,fstprim,As1,As2,Mmax,...
    Mmin,Ntillhmax,Ntillhmin)
%-----
% Funktion som beräknar x och epsilon för det okända armeringslagret
% för varje snitt för max- och minmoment
%
% Input:
% fcc          betongens hållfasthet
% b            bredden på tvärsnittet
% d1          avstånd från ök till det understa armeringslagret
% d2          avstånd från ök till det näst understa
%             armeringslagret
% d3          avstånd från ök till det tredje understa
%             armeringslagret
% d1prim      avstånd från uk till det översta armeringslagret
% d2prim      avstånd från uk till det näst översta
%             armeringslagret
% d3prim      avstånd från uk till det tredje översta
%             armeringslagret
% h           tvärsnittshöjd
% fst         stålhållfastheten
% As1         totala tvärsnittsarean på det understa
%             armeringslagret
% As2         totala tvärsnittsarean på det näst understa
%             armeringslagret
% Mmax        maxmoment
% Mmin        minmoment
% Ntillhmax   normalkraft tillhörande maxmomentet
% Ntillhmin   normalkraft tillhörande minmomentet
%
% Output:
% xmaxi       avstånd från ök från maxmomentet för varje snitt
% xmini       avstånd från ök från minmomentet för varje snitt
% antlageri   antal armeringslager som behövs för varje snitt
%-----
fst(1);
if fst(1)==0
    %Antag tre lager armering, gäller för fst=0
    if Mmax>=0
        Asmaxii=(Mmax-0.9*d1*As1*fst(1)-0.9*d2*As2*fst(2))/(0.9*...
            d3*fst(3));
        if Asmaxii>0.001 % dvs tre lager armering behövs
            momekvmax=[-0.8*fcc*b*0.4, 0.8*fcc*b*d3, -Ntillhmax*...
                (d3-h/2)+fst(2)*As2*(d2-d3)+fst(1)*As1*(d1-d3)-Mmax];
            [xmaxi]=roots(momekvmax);
            antlagermaxi=3;
            %As3=sökt
        else % dvs två lager armering behövs i och med att det första
            & är noll
            momekvmax=[-0.8*fcc*b*0.4, 0.8*fcc*b*d2, -Ntillhmax*...
                (d2-h/2)+fst(1)*As1*(d1-d2)-Mmax];
            [xmaxi]=roots(momekvmax);
            antlagermaxi=2;
            %As2=sökt
        end
    else
        Mmax=abs(Mmax);
        fst=[fstprim;fstprim; fstprim];
        Asmaxii=(Mmax-0.9*d1prim*As1*fst(1))/(0.9*d2prim*fst(2));
        %As1prim=As1
    end
end

```



```

if Asmaxii>(As1+As2) % dvs tre lager armering behövs
    momekvmax=[-0.8*fcc*b*0.4, 0.8*fcc*b*d3prim,...
        -Ntillhmax*(d3prim-h/2)+fst(2)*As2*...
        (d2prim-d3prim)+fst(1)*As1*(d1prim-d3prim)-Mmax];
    [xmaxi]=roots(momekvmax);
    antlagermaxi=3;
    %As1prim=As1prim
    %As2prim=As2prim
    %As3prim=sökt
elseif Asmaxii<As1 % dvs ett lager armering behövs
    momekvmax=[-0.8*fcc*b*0.4, 0.8*fcc*b*d1prim,...
        -Ntillhmax*(d1prim-h/2)-Mmax];
    [xmaxi]=roots(momekvmax);
    antlagermaxi=1;
    %As1prim=sökt
else
    momekvmax=[-0.8*fcc*b*0.4, 0.8*fcc*b*d2prim,...
        -Ntillhmax*(d2prim-h/2)+fst(1)*As1*(d1prim-...
        d2prim)-Mmax];
    [xmaxi]=roots(momekvmax);
    antlagermaxi=2;
    %As1prim=As1prim
    %As2prim=sökt
end
end

if Mmin>=0
    Asminii=(Mmin-0.9*d1*As1*fst(1)-0.9*d2*As2*fst(2))/...
        (0.9*d3*fst(3));
    if Asminii>0 % dvs tre lager armering behövs
        momekvmin=[-0.8*fcc*b*0.4, 0.8*fcc*b*d3, -Ntillhmin*...
            (d3-h/2)+fst(2)*As2*(d2-d3)+fst(1)*As1*(d1-d3)-Mmin];
        [xmini]=roots(momekvmin);
        antlagermini=3;
        %As1=As1=0
        %As2=As2
        %As3=sökt
    else % dvs två lager armering behövs
        momekvmin=[-0.8*fcc*b*0.4, 0.8*fcc*b*d2, -Ntillhmin*...
            (d2-h/2)+...
            fst(1)*As1*(d1-d2)-Mmin];
        [xmini]=roots(momekvmin);
        antlagermini=2;
        %As2=sökt
    end
else
    Mmin=abs(Mmin);
    fst=[fstprim;fstprim;fstprim];
    Asminii=(Mmin-0.9*d1prim*As1*fst(1))/(0.9*d2prim*fst(2));
    %As1prim=As1
    if Asminii>(As1+As2) % dvs tre lager armering behövs
        momekvmin=[-0.8*fcc*b*0.4, 0.8*fcc*b*d3prim,...
            -Ntillhmin*(d3prim-h/2)+fst(2)*As2*(d2prim-...
            d3prim)+fst(1)*As1*(d1prim-d3prim)-Mmin];
        [xmini]=roots(momekvmin);
        antlagermini=3;
        %As1prim=As1prim
        %As2prim=As2prim
        %As3prim=sökt
    elseif Asminii<As1 % dvs ett lager armering behövs
        momekvmin=[-0.8*fcc*b*0.4, 0.8*fcc*b*d1prim,...

```

```

        -Ntillhmin*(dlprim-h/2)-Mmin];
[xmini]=roots(momekvmin);
antlagermini=1;
%As1prim=sökt
else
momekvmin=[-0.8*fcc*b*0.4, 0.8*fcc*b*d2prim,...
-Ntillhmin*(d2prim-h/2)+...
fst(1)*As1*(dlprim-d2prim)-Mmin];
[xmini]=roots(momekvmin);
antlagermini=2;
%As1prim=As1prim
%As2prim=sökt
end
end

else
%Antag två lager armering, gäller för fst>0
if Mmax>=0
Asmaxii=(Mmax-0.9*d1*As1*fst(1))/(0.9*d2*fst(2));
if Asmaxii>(As1+As2) % dvs tre lager armering behövs
momekvmax=[-0.8*fcc*b*0.4, 0.8*fcc*b*d3, -Ntillhmax*...
(d3-h/2)+fst(2)*As2*(d2-d3)+fst(1)*As1*(d1-d3)-Mmax];
[xmaxi]=roots(momekvmax);
antlagermaxi=3;
%As1=As1
%As2=As2
%As3=sökt
elseif Asmaxii<As1 % dvs ett lager armering behövs
momekvmax=[-0.8*fcc*b*0.4, 0.8*fcc*b*d1, -Ntillhmax*...
(d1-h/2)-Mmax];
[xmaxi]=roots(momekvmax);
antlagermaxi=1;
%As1=sökt
else
momekvmax=[-0.8*fcc*b*0.4, 0.8*fcc*b*d2, -Ntillhmax*...
(d2-h/2)+...
fst(1)*As1*(d1-d2)-Mmax];
[xmaxi]=roots(momekvmax);
antlagermaxi=2;
%As1=As1
%As2=sökt
end

else
Mmax=abs(Mmax);
fst=[fstprim;fstprim; fstprim];
Asmaxii=(Mmax-0.9*dlprim*As1*fst(1))/(0.9*d2prim*fst(2));
%As1prim=As1
if Asmaxii>(As1+As2) % dvs tre lager armering behövs
momekvmax=[-0.8*fcc*b*0.4, 0.8*fcc*b*d3prim,...
-Ntillhmax*(d3prim-h/2)+fst(2)*As2*(d2prim-d3prim)+...
fst(1)*As1*(dlprim-d3prim)-Mmax];
[xmaxi]=roots(momekvmax);
antlagermaxi=3;
%As1prim=As1prim
%As2prim=As2prim
%As3prim=sökt
elseif Asmaxii<As1 % dvs ett lager armering behövs
momekvmax=[-0.8*fcc*b*0.4, 0.8*fcc*b*dlprim,...
-Ntillhmax*(dlprim-h/2)-Mmax];
[xmaxi]=roots(momekvmax);

```

```

        antlagermaxi=1;
        %As1prim=sökt
    else
        momekvmax=[-0.8*fcc*b*0.4, 0.8*fcc*b*d2prim,...
            -Ntillhmax*(d2prim-h/2)+fst(1)*As1*(d1prim-d2prim)...
            -Mmax];
        [xmaxi]=roots(momekvmax);
        antlagermaxi=2;
        %As1prim=As1prim
        %As2prim=sökt
    end
end

if Mmin>=0
    Asminii=(Mmin-0.9*d1*As1*fst(1))/(0.9*d2*fst(2));
    if Asminii>(As1+As2) % dvs tre lager armering behövs
        momekvmin=[-0.8*fcc*b*0.4, 0.8*fcc*b*d3, -Ntillhmin*...
            (d3-h/2)+fst(2)*As2*(d2-d3)+fst(1)*As1*(d1-d3)-Mmin];
        [xmini]=roots(momekvmin);
        antlagermini=3;
        %As1=As1
        %As2=As2
        %As3=sökt
    elseif Asminii<As1 % dvs ett lager armering behövs
        momekvmin=[-0.8*fcc*b*0.4, 0.8*fcc*b*d1, -Ntillhmin*...
            (d1-h/2)-Mmin];
        [xmini]=roots(momekvmin);
        antlagermini=1;
        %As1=sökt
    else
        momekvmin=[-0.8*fcc*b*0.4, 0.8*fcc*b*d2, -Ntillhmin*...
            (d2-h/2)+fst(1)*As1*(d1-d2)-Mmin];
        [xmini]=roots(momekvmin);
        antlagermini=2;
        %As1=As1
        %As2=sökt
    end
else
    Mmin=abs(Mmin);
    fst=[fstprim;fstprim;fstprim];
    Asminii=(Mmin-0.9*d1prim*As1*fst(1))/(0.9*d2prim*fst(2));
    %As1prim=As1
    if Asminii>(As1+As2) % dvs tre lager armering behövs
        momekvmin=[-0.8*fcc*b*0.4, 0.8*fcc*b*d3prim,...
            -Ntillhmin*(d3prim-h/2)+fst(2)*As2*(d2prim-d3prim)+...
            fst(1)*As1*(d1prim-d3prim)-Mmin];
        [xmini]=roots(momekvmin);
        antlagermini=3;
        %As1prim=As1prim
        %As2prim=As2prim
        %As3prim=sökt
    elseif Asminii<As1 % dvs ett lager armering behövs
        momekvmin=[-0.8*fcc*b*0.4, 0.8*fcc*b*d1prim,...
            -Ntillhmin*(d1prim-h/2)-Mmin];
        [xmini]=roots(momekvmin);
        antlagermini=1;
        %As1prim=sökt
    else
        momekvmin=[-0.8*fcc*b*0.4, 0.8*fcc*b*d2prim,...
            -Ntillhmin*(d2prim-h/2)+fst(1)*As1*(d1prim-d2prim)-Mmin];
        [xmini]=roots(momekvmin);

```

```
        antlagermini=2;
        %As1prim=As1prim
        %As2prim=sökt
    end
end
end

if xmaxi(1)<h
    xmaxi=xmaxi(1);
else
    xmaxi=xmaxi(2);
end

if xmin(1)<h
    xmin=xmin(1);
else
    xmin=xmin(2);
end
```

APPENDIX F 12 (23)

```
function [epsilonsmaxi,epsilonsmini]=epsilonber(antlagermax,...
    antlagermin,d1,d2,d3,d1prim,d2prim,d3prim,xmax,xmin,epsiloncu,...
    Mmax,Mmin)
%-----
% Funktion som beräknar ståltöjningen för det okända armeringslagret
% för varje snitt för max- och minmoment
%
% Input:
%   antlagermax    antalet armeringslager som krävs för maxmomentet
%                  i varje snitt
%   antlagermin    antalet armeringslager som krävs för minmomentet
%                  i varje snitt
%   d1             avstånd från ök till det understa armeringslagret
%   d2             avstånd från ök till det näst understa
%                  armeringslagret
%   d3             avstånd från ök till det tredje understa
%                  armeringslagret
%   d1prim         avstånd från uk till det översta armeringslagret
%   d2prim         avstånd från uk till det näst översta
%                  armeringslagret
%   d3prim         avstånd från uk till det tredje översta
%                  armeringslagret
%   xmax           avstånd från ök resp uk till tryckzonens slut för
%                  maxmomentet i varje snitt
%   xmin           avstånd från ök resp uk till tryckzonens slut för
%                  minmomentet i varje snitt
%   epsiloncu      betongstukning?
%   Mmax           maxmoment
%   Mmin           minmoment
%
% Output:
%   epsilonsmaxi   ståltöjning i varje snitt för maxmomentet
%   epsilonsmini   ståltöjning i varje snitt för minmomentet
%-----

if Mmax>=0
    if antlagermax==1
        epsilonsmaxi=((d1-xmax)/xmax)*epsiloncu;
    elseif antlagermax==2
        epsilonsmaxi=((d2-xmax)/xmax)*epsiloncu;
    elseif antlagermax==3
        epsilonsmaxi=((d3-xmax)/xmax)*epsiloncu;
    end
else
    if antlagermax==1
        epsilonsmaxi=((d1prim-xmax)/xmax)*epsiloncu;
    elseif antlagermax==2
        epsilonsmaxi=((d2prim-xmax)/xmax)*epsiloncu;
    elseif antlagermax==3
        epsilonsmaxi=((d3prim-xmax)/xmax)*epsiloncu;
    end
end

if Mmin>=0
    if antlagermin==1
        epsilonsmini=((d1-xmin)/xmin)*epsiloncu;
    elseif antlagermin==2
        epsilonsmini=((d2-xmin)/xmin)*epsiloncu;
    elseif antlagermin==3
        epsilonsmini=((d3-xmin)/xmin)*epsiloncu;
    end
end
```

```
else
  if antlagermin==1
    epsilonstini=((d1prim-xmin)/xmin)*epsiloncu;
  elseif antlagermin==2
    epsilonstini=((d2prim-xmin)/xmin)*epsiloncu;
  elseif antlagermin==3
    epsilonstini=((d3prim-xmin)/xmin)*epsiloncu;
  end
end
end
```

APPENDIX F 14 (23)

```
function [Asmaxi]=Asmaxber (antlagermax, fcc, b, xmax, Ntillhmax, fst, ...
    fstprim, As1, As2, Mmax)
%-----
% Funktion som beräknar arean för det okända armeringslagret och
% antalet lager som krävs för varje snitt för maxmoment
%
% Input:
% antlagermax      antalet armeringslager som krävs
% fcc              betongens hållfasthet
% b               bredden på tvärsnittet
% xmax            avstånd från ök till tryckzonens slut
% Ntillhmax       normalkraft tillhörande maxmomentet
% fst             stålhållfastheten för drag i uk
% fstprim         stålhållfastheten för drag i ök
% As1             totala tvärsnittsarean på det understa
%                armeringslagret
% As2             totala tvärsnittsarean på det näst understa
%                armeringslagret
% Mmax            maxmoment
%
% Output:
% Asmaxi          arean för det okända armeringslagret för
%                maxmomentet för varje snitt
% antlagermax     antal armeringslager som behövs för varje snitt
%                för maxmomentet
%-----

if Mmax>=0
    if antlagermax==1
        Asmaxi=(0.8*fcc*b*xmax-Ntillhmax)/fst(1);
    elseif antlagermax==2
        Asmaxi=(0.8*fcc*b*xmax-Ntillhmax-fst(1)*As1)/fst(2);
    elseif antlagermax==3
        Asmaxi=(0.8*fcc*b*xmax-Ntillhmax-fst(1)*As1-fst(2)*As2)/...
            fst(3);
    end
else
    fst=[fstprim;fstprim;fstprim];
    if antlagermax==1
        Asmaxi=(0.8*fcc*b*xmax-Ntillhmax)/fst(1);
    elseif antlagermax==2
        Asmaxi=(0.8*fcc*b*xmax-Ntillhmax-fst(1)*As1)/fst(2);
    elseif antlagermax==3
        Asmaxi=(0.8*fcc*b*xmax-Ntillhmax-fst(1)*As1-fst(2)*As2)/...
            fst(3);
    end
end
end
```



```

function [Asmini]=Asminber (antlagermin, fcc, b, xmin, Ntillhmin, fst, ...
    fstprim, As1, As2, Mmin)
%-----
% Funktion som beräknar arean för det okända armeringslagret och
% antalet lager som krävs för varje snitt för minmoment
%
% Input:
%   antlagermin   antalet armeringslager som krävs
%   fcc           betongens hållfasthet
%   b             bredden på tvärsnittet
%   xmin         avstånd från ök till tryckzonens slut
%   Ntillhmin    normalkraft tillhörande minmomentet
%   fst          stålhållfastheten för drag i uk
%   fstprim      stålhållfastheten för drag i ök
%   As1          totala tvärsnittsarean på det understa
%               armeringslagret
%   As2          totala tvärsnittsarean på det näst understa
%               armeringslagret
%   Mmin         minmoment
%
% Output:
%   Asmini       arean för det okända armeringslagret för
%               minmomentet för varje snitt
%   antlagermin  antal armeringslager som behövs för varje snitt
%               för minmomentet
%-----

if Mmin>=0
    if antlagermin==1
        Asmini=(0.8*fcc*b*xmin-Ntillhmin)/fst(1);
    elseif antlagermin==2
        Asmini=(0.8*fcc*b*xmin-Ntillhmin-fst(1)*As1)/fst(2);
    elseif antlagermin==3
        Asmini=(0.8*fcc*b*xmin-Ntillhmin-fst(1)*As1-fst(2)*As2)/...
            fst(3);
    end
else
    fst=[fstprim;fstprim;fstprim];
    if antlagermin==1
        Asmini=(0.8*fcc*b*xmin-Ntillhmin)/fst(1);
    elseif antlagermin==2
        Asmini=(0.8*fcc*b*xmin-Ntillhmin-fst(1)*As1)/fst(2);
    elseif antlagermin==3
        Asmini=(0.8*fcc*b*xmin-Ntillhmin-fst(1)*As1-fst(2)*As2)/...
            fst(3);
    end
end
end

```

APPENDIX F 16 (23)

```
function [Astotmaxi,Astotmini]=Astotber (antlagermax,Asmax,As1,As2,...
    antlagermin,Asmin)
%-----
% Funktion som beräknar totala armeringsarean som krävs för varje
% snitt för max- resp minmomentet
%
% Input:
%   antlagermax   antalet armeringlager som krävs
%   Asmax         arean för det okända armeringslagret
%   As1          totala tvärsnittsarean på det understa
%               armeringslagret
%   As2          totala tvärsnittsarean på det näst understa
%               armeringslagret
%   antlagermin   antalet armeringlager som krävs
%   Asmax         arean för det okända armeringslagret
%
% Output:
%   Astotmaxi     totala armeringsarean för maxmomentet för varje
%               snitt
%   Astotmini     totala armeringsarean för minmomentet för varje
%               snitt
%-----
if antlagermax==1
    if Asmax<=0
        Astotmaxi=0;
    else
        Astotmaxi=Asmax;
    end
elseif antlagermax==2
    if Asmax<=0
        Astotmaxi=As1;
    else
        Astotmaxi=As1+Asmax;
    end
elseif antlagermax==3
    if Asmax<=0
        Astotmaxi=As1+As2
    else
        Astotmaxi=As1+As2+Asmax;
    end
end

if antlagermin==1
    if Asmin<=0
        Astotmini=0;
    else
        Astotmini=Asmin;
    end
elseif antlagermin==2
    if Asmin<=0
        Astotmini=As1;
    else
        Astotmini=As1+Asmin;
    end
elseif antlagermin==3
    if Asmin<=0
        Astotmini=As1+As2;
    else
        Astotmini=As1+As2+Asmin;
    end
end
end
```

```
function [lbi]=forankring(Mmax,Mmin,fi,fct,fst)
%-----
% Funktion som beräknar förankringslängderna
%
% Input:
%   Mmax          maxmoment
%   Mmin          minmoment
%   fi            armeringsstångens diameter
%   fct           betongens draghållfasthet
%   fst           stålhållfastheten
%
% Output:
%   lbi           förankringslängd för varje snitt
%-----

eta=1.4; % för kamstänger
c=0.034;
if Mmax>=0
    etal=0.8;
else
    etal=0.7;
end
if Mmin>=0
    etal=0.8;
else
    etal=0.7;
end
for j=1:3
    fb(j,1)=eta*etal*(1/3)*(1+(2*c)/fi)*fct(j);
    lbi(1,j)=(fst(j)/fb(j))*(fi/4);
end
```

APPENDIX F 18 (23)

```
function [Astotmaxiplot,Astotminiplot]=Astotplot(Mmax,Astotmax,...
    Mmin,Astotmin)
%-----
% Funktion som avgör om armeringen är drag i ök eller uk för varje
% snitt för max- resp minmomentet
%
% Input:
%   Mmax           maxmomentet
%   Astotmax       totala armeringsarean som krävs för varje snitt
%                 för maxmomentet
%   Mmin           minmomentet
%   Astotmin       totala armeringsarean som krävs för varje snitt
%                 för maxmomentet
%
% Output:
%   Astotmaxiplot  totala armeringsarean för maxmomentet för varje
%                 snitt anpassad för plottning
%   Astotminiplot  totala armeringsarean för minmomentet för varje
%                 snitt anpassad för plottning
%-----

if Mmax>=0
    Astotmaxiplot=Astotmax;
else
    Astotmaxiplot=-Astotmax;
end
if Mmin>=0
    Astotminiplot=Astotmin;
else
    Astotminiplot=-Astotmin;
end
```

```

function [zmax,zmin,Astotmaxplot,Astotminplot]=zplot(z,d1,...
    Astotmaxploti,Astotminploti,Mmax,Mmin)
%-----
% Funktion som förskjuter dragkraftsbehovskurvan för varje snitt för
% max- och minmoment
%
% Input:
% z          koordinat längs tvärsnittet
% d1         avstånd från ök till det understa
%           armeringslagret, förskjuter kurvan med d1 för att
%           vara på säkra sidan
% Astotmaxploti  plotanpassade totala arean för maxmomentet i
%           varje snitt
% Astotminploti  plotanpassade totala arean för minmomentet i
%           varje snitt
% Mmax        maxmoment
% Mmin        minmoment
%
% Output:
% zmax        förskjuten z-koord från maxmomentet i varje snitt
% zmin        förskjuten z-koord från minmomentet i varje snitt
% Astotmaxplot  förskjuten plotanpassade totala arean för
%           maxmomentet i varje snitt
% Astotminplot  förskjuten plotanpassade totala arean för
%           minmomentet i varje snitt
%-----

for i=1:8
    if Mmax(i)>=0
        zmaxi=z(i)-1.5*d1(i);
        if zmaxi<0
            zmax(i,1)=0;
        else
            zmax(i,1)=zmaxi;
        end
    else
        zmaxi=z(i)+1.5*d1(i);
        zmax(i,1)=zmaxi;
    end
    if Mmin(i)>=0
        zmini=z(i)-1.5*d1(i);
        if zmini<0
            zmin(i,1)=0;
        else
            zmin(i,1)=zmini;
        end
    else
        zmini=z(i)+1.5*d1(i);
        zmin(i,1)=zmini;
    end
    Astotmaxplot(i,1)=Astotmaxploti(i);
    Astotminplot(i,1)=Astotminploti(i);
end
for i=9 %Drag hela tiden i snitt 9
    zmax(i,1)=z(i)-1.5*d1(i);
    zmin(i,1)=z(i)-1.5*d1(i);
    zmax(i+1,1)=z(i)+1.5*d1(i);
    zmin(i+1,1)=z(i)+1.5*d1(i);
    Astotmaxplot(i,1)=Astotmaxploti(i);
    Astotminplot(i,1)=Astotminploti(i);
    Astotmaxplot(i+1,1)=Astotmaxploti(i);
end

```

```
    Astotminplot(i+1,1)=Astotminploti(i);
end
for i=10:15
    if Mmax(i)>=0
        zmaxi=z(i)+1.5*d1(i);
        if zmaxi>20.44
            zmax(i+1,1)=20.44;
        else
            zmax(i+1,1)=zmaxi;
        end
    else
        zmaxi=z(i)-1.5*d1(i);
        zmax(i+1,1)=zmaxi;
    end
    if Mmin(i)>=0
        zmini=z(i)+1.5*d1(i);
        if zmini>20.44
            zmin(i+1,1)=20.44;
        else
            zmin(i+1,1)=zmini;
        end
    else
        zmini=z(i)-1.5*d1(i);
        zmin(i+1,1)=zmini;
    end
    Astotmaxplot(i+1,1)=Astotmaxploti(i);
    Astotminplot(i+1,1)=Astotminploti(i);
end
```

```

function [dmimax, ksiimax, dmimin, ksiimin]=dmber(Mmax,Mmin,...
    antlagermax,d1,d2,d3,As1,As2,Asmax,Astotmax,dlprim,d2prim,...
    d3prim,antlagermin,Asmin,Astotmin)
%-----
% Funktion som beräknar dmedel och ksi för varje snitt för max- och
% minmoment
%
% Input:
% Mmax          maxmoment
% Mmin          minmoment
% antlagermax   antalet armeringslager som maxmomentet kräver
% d1            avstånd från ök till det understa armeringslagret
% d2            avstånd från ök till det näst understa
%               armeringslagret
% d3            avstånd från ök till det tredje understa
%               armeringslagret
% As1           totala tvärsnittsarean på det understa
%               armeringslagret
% As2           totala tvärsnittsarean på det näst understa
%               armeringslagret
% Asmax        arean på det sökta armeringslagret för
%               maxmomentet
% Astotmax     totala armeringsarean som krävs för maxmomentet
% dlprim       avstånd från uk till det översta armeringslagret
% d2prim       avstånd från uk till det näst översta
%               armeringslagret
% d3prim       avstånd från uk till det tredje översta
%               armeringslagret
% antlagermin  antalet armeringslager som minmomentet kräver
% Asmin        arean på det sökta armeringslagret för minmomentet
% Astotmin     totala armeringsarean som kräva för minmomentet
%
% Output:
% dmimax       effektivhöjd för maxmomentet för varje snitt
% ksiimax      faktor som beaktar inverkan av effektiv höjd i
%               varje snitt för maxmomentet
% dmimin       effektivhöjd för minmomentet i varje snitt
% ksiimin      faktor som beaktar inverkan av effektiv höjd i
%               varje snitt för maxmomentet
%-----

if Mmax>=0
    if antlagermax==1
        dmimax=d1;
    elseif antlagermax==2
        dmimax=(d1*As1+d2*Asmax)/Astotmax;
    elseif antlagermax==3
        dmimax=(d1*As1+d2*As2+d3*Asmax)/Astotmax;
    end
else
    if antlagermax==1
        dmimax=dlprim;
    elseif antlagermax==2
        dmimax=(dlprim*As1+d2prim*Asmax)/Astotmax;
    elseif antlagermax==3
        dmimax=(dlprim*As1+d2prim*As2+d3prim*Asmax)/Astotmax;
    end
end

if Mmin>=0
    if antlagermin==1

```

```
        dmimin=d1;
    elseif antlagermin==2
        dmimin=(d1*As1+d2*Asmin)/Astotmin;
    elseif antlagermin==3
        dmimin=(d1*As1+d2*As2+d3*Asmin)/Astotmin;
    end
else
    if antlagermin==1
        dmimin=d1prim;
    elseif antlagermin==2
        dmimin=(d1prim*As1+d2prim*Asmin)/Astotmin;
    elseif antlagermin==3
        dmimin=(d1prim*As1+d2prim*As2+d3prim*Asmin)/Astotmin;
    end
end

if dmimax<=1
    ksiimax=1.3-0.4*dmimax; %Inget dm är mindre än 0,5m
else
    ksiimax=0.9;
end

if dmimin<=1
    ksiimin=1.3-0.4*dmimin; %Inget dm är mindre än 0,5m
else
    ksiimin=0.9;
end
```

```

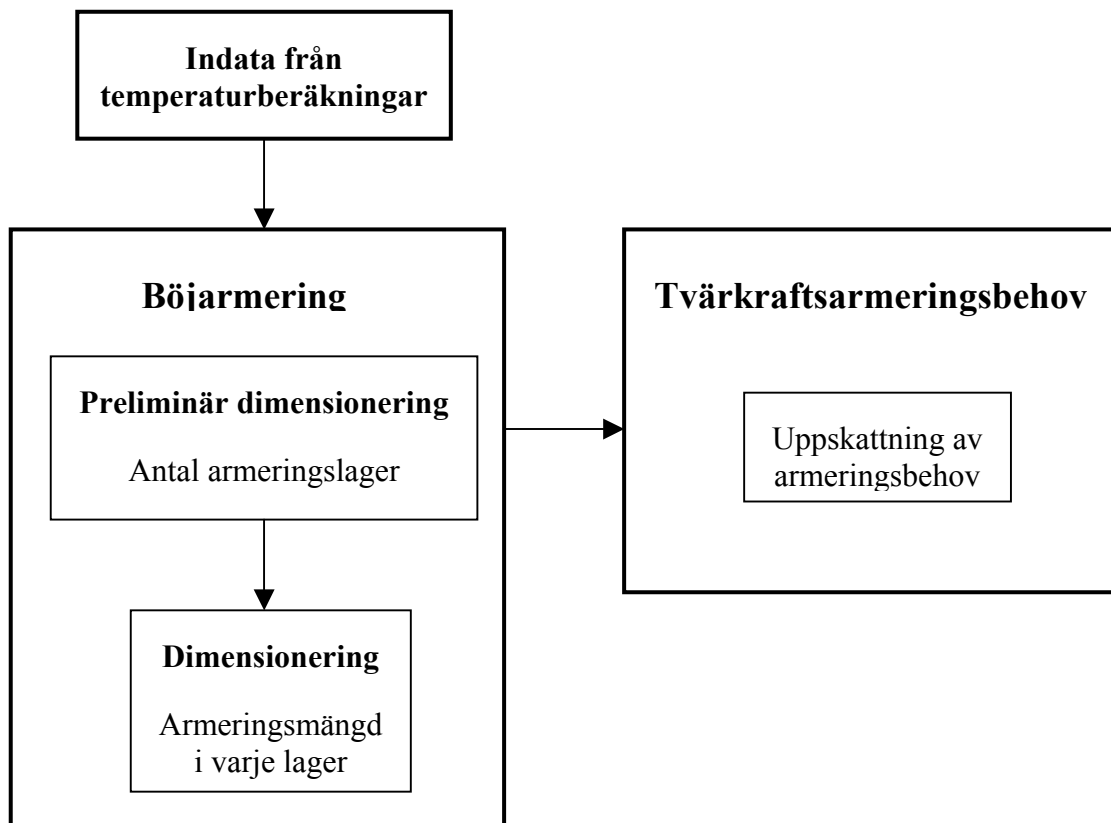
function [fvmaxi, fvmini]=fvber (As0, bw, dmax, ksimax, fct, dmin, ksimin)
%-----
% Funktion som beräknar skjuvhållfastheten i varje snitt för max- och
% minmoment
%
% Input:
%   As0           minsta böjarmeringsmängd i dragen zon inom
%                 betraktad konstruktionsdel
%   bw            livbredd (minsta bredd inom effektiva höjden)
%   dmax          effektiv medelhöjd för maxmomentet
%   ksimax        faktor som beaktar inverkan av effektiv höjd för
%                 maxmomentet
%   fct           betongens draghållfasthet
%   dmin          effektiv medelhöjd för minmomentet
%   ksimin        faktor som beaktar inverkan av effektiv höjd för
%                 minmomentet
%
% Output:
%   fvmaxi        betongens skjuvhållfasthet från maxmomentet i
%                 varje snitt
%   fvmini        betongens skjuvhållfasthet från minmomentet i
%                 varje snitt
%-----

ramax=As0/(bw*dmax);
if ramax>0.02
    ramax=0.02;
else
    ramax=ramax;
end
fvmaxi=ksimax(1+50*ramax)*0.30*fct %Vilket fct ska användas?

ramin=A0/(bw*dmin);
if ramin>0.02
    ramin=0.02;
else
    ramin=ramin;
end
fvmini=ksimin(1+50*ramin)*0.30*fct

```

Programmets uppbyggnad



APPENDIX E 2 (6)

```
%-----
% 2004-04-28
%
% Examensarbete:      Brandpåverkan på betongkonstruktioner - Tunnlar
%
% Författare:        Helena Lond
%
%-----
% Programmet läser indata från filerna:          GeometriMedIso.txt
%                                                GeometriUtanIso.txt
%                                                MoN.txt
%                                                fst.txt
%
% och beräknar därefter ut den mängd armering som krävs för de olika
% snitten samt
% de sex olika lastfallen:          1. GT-kurvan utan isolering
%                                   2. RWS-kurvan utan isolering
%                                   3. Citytunnelkurvan utan isolering
%                                   4. GT-kurvan med isolering
%                                   5. RWS-kurvan med isolering
%                                   6. Citytunnelkurvan med isolering
%-----
clear all
close all
clc
lf=input('Ange lastfall (1-6): ');

%---INLÄSNING AV INDATA---
if lf>3
    %---Inläsning av geometrin för fallet med isolering (ej reducerat
tvärsnitt)---
    fp1=fopen('GeometriMedIso.txt','r');          % r=read
    [z,h,d1,d2,d3,d1prim,d2prim,d3prim]=geomediso(fp1);
    ST1=fclose(fp1);
else
    %---Inläsning av geometrin för fallet utan isolering (reducerat
tvärsnitt)---
    fp2=fopen('GeometriUtanIso.txt','r');          % r=read
    [z,h,d1,d2,d3,d1prim,d2prim,d3prim]=geoutaniso(fp2,lf);
    ST2=fclose(fp2);
end

%---Inläsning av M och N---
fp3=fopen('MoN.txt','r');          % r=read
[Mmax,Ntillhmax,Mmin,Ntillhmin]=MoN(fp3);
ST3=fclose(fp3);

%---Materialindata---
fcc=26.7e6;
fct=1.7e6;
Ec=33e6;
Es=200e6;
epsiloncu=3.5e-3;
fstprim=500e6;

%---Inläsning av fst för de olika lastfallen---
fp4=fopen('fst.txt','r');
[fst]=fstin(fp4,lf);
ST4=fclose(fp4);

fi=0.032;
```

```

As1=(pi*fi^2)/4)*8;
As2=(pi*fi^2)/4)*8;
b=1;

%---Inläsning av fct för de olika lastfallen---
[fp5]=fopen('fct.txt','r');
[fct]=fctin(fp5,lf);
ST5=fclose(fp5);

fst(1);
%---MOMENTKAPACITET---
for i=1:15
    %---Beräknar x och antalet armeringslager---
    [xmax(i,1), xmin(i,1),
    antlagermax(i,1), antlagermin(i,1)]=xberdragotryck(fcc,b,d1(i),d2(i),d
    3(i),h(i),dlprim(i),...

    d2prim(i),d3prim(i),fst,fstprim,As1,As2,Mmax(i),Mmin(i),Ntillhmax(i),
    Ntillhmin(i));

    %---Beräknar ståltöjningen---
    [epsilonsmax(i,1),
    epsilonsmin(i,1)]=epsilonber(antlagermax(i),antlagermin(i),d1(i),d2(i)
    ),d3(i),dlprim(i),...
    d2prim(i),d3prim(i),xmax(i),xmin(i),epsiloncu,Mmax(i),Mmin(i));

    %---BERÄKNING AV As---
    %---Kontroll om stålet flyter eller ej---
    if epsilonsmax(i)>2.5e-3

    [Asmax(i,1),antlagermax(i,1)]=Asmaxber(antlagermax(i),fcc,b,xmax(i),N
    tillhmax(i),fst,fstprim,As1,As2,Mmax(i));
    else
        disp('maxstålet flyter ej')
    end

    if epsilonsmin(i)>2.5e-3

    [Asmin(i,1)]=Asminber(antlagermin(i),fcc,b,xmin(i),Ntillhmin(i),fst,f
    stprim,As1,As2,Mmin(i));
    else
        disp('minstålet flyter ej')
    end

    %---Beräknar ut den totala mängd area som behövs---

    [Astotmax(i,1),Astotmin(i,1)]=Astotber(antlagermax(i),Asmax(i),As1,As
    2,antlagermin(i),Asmin(i));

    %---Beräknar förankringslängder---

    [lbmaxi,fbmaxi,lbmini,fbmini]=forankring(Mmax(i),Mmin(i),fi,fct,fst);
    lbmax(i,:)=lbmaxi;
    lbmin(i,:)=lbmini;
    fbmax(i,:)=fbmaxi;
    fbmin(i,:)=fbmini;

    %---Avgör om den area som ska plottas är dragen i uk lr ök---

    [Astotmaxplot(i,1),Astotminplot(i,1)]=Astotplot(Mmax(i),Astotmax(i),M
    min(i),Astotmin(i));

```

APPENDIX E 4 (6)

```
end

lb=[lbmax lbmin];
fb=[fbmax fbmin];
[zmax, zmin,
Astotmaxplot,Astotminplot]=zplot(z,d1,Astotmaxplot,Astotminplot,Mmax,
Mmin);

Astot=[Astotmax Astotmin];
%disp(' Asmax antlager xmax Asmin antlager xmin')
[utdata]=[Asmax antlagermax xmax Asmin antlagermin xmin Astot];

disp(' max min')
Astot=[Astotmax*10^6 Astotmin*10^6];

%plotparmax=['-', 'x'];
%plotparmin=['-', 'm', '*'];
%hold on
%plot(zmax,Astotmaxplot*10^6,plotparmax)
%plot(zmin,Astotminplot*10^6,plotparmin)
%axis('ij')
%xlim([0,20.44])
%ylim([-1e4,2e4])
%legend('max', 'min')
%grid on
%xlabel('z [m]')
%ylabel('As [mm^2/m]')
%hold off
antstang=Astot/804;
%---Beräknar antalet jämna stänger---
ant_stang=ceil(antstang);
ant_stangmax=ant_stang(:,1);
ant_stangmin=ant_stang(:,2);
vektor1=[5 7 9 11 13 15 17 19 21 23]';
vektor2=[6 10 14 18 22]';
[v1,v]=size(vektor1);
[v2,v]=size(vektor2);
for ii=1:15

[ant_stangmax(ii,1),ant_stangmin(ii,1)]=antstang(ant_stangmax(ii,1),a
nt_stangmin(ii,1),v1,vektor1,v2,vektor2);
end

[znymax,znymin]=forskj(Mmax,d1,Mmin,z);
ant_stang=[ant_stangmax ant_stangmin];

%---Inläsning av As0 för de olika lastfallen---
[fp6]=fopen('As0.txt','r');
[As0max,As0min]=as0in(fp6,lf);
ST6=fclose(fp6);

for kk=1:6
As0(kk,1)=abs(As0min(kk));
end
for kk=7
As0(kk,1)=min(abs(As0min(kk)),As0max(kk));
end
for kk=8:10
As0(kk,1)=As0max(kk);
end
for kk=11:16
```

```

    As0(kk,1)=min(abs(As0min(kk)),As0max(kk));
end

for kkk=9:16
    As01(kkk-1,1)=As0(kkk);
end
for kkk=1:7
    As01(kkk)=As0(kkk);
end
As0=As01;

%---TVÄRKRAFTSKAPACITET---
bw=1;
fct1=1.7e6; %förenkling
Nvmax=[-66 -66.7 -66.7 -69.8 -71 -71.6 -65.2 -50.2 -34 -23.5 -5.4 -
5.5 -16.2 -16.2 -16.2]';
Nvmax=Nvmax*1000
Nvmin=[-356.2 -356.8 -356.8 -359.8 -361.6 -367.1 -373.8 -380.6 -397.4
-395.3 -385.5 -383.4 -370.8 -370.8 -365.8]';
Nvmin=Nvmin*1000
for j=1:15
    %---Beräknar ksi och dm---

    [dmimax,ksiimax,dmimin,ksiimin]=dmber(Mmax(j),Mmin(j),antlagermax(j),
d1(j),d2(j),d3(j),As1,As2,Asmax(j),Astotmax(j),...

    dlprim(j),d2prim(j),d3prim(j),antlagermin(j),Asmin(j),Astotmin(j));
    dmmax(j,1)=dmimax;
    ksimax(j,1)=ksiimax;
    dmmin(j,1)=dmimin;
    ksimin(j,1)=ksiimin;

    %---Beräknar betongens formella skjuvhållfasthet---

    [fvmaxi,fvmini]=fvber(As0(j),bw,dmmax(j),ksimax(j),fct1,dmmin(j),ksim
in(j));
    fvmax(j,1)=fvmaxi;
    fvmin(j,1)=fvmini;

    %---Betongens tvärkraftskapacitet---
    Vcmax(j,1)=bw*dmmax(j)*fvmax(j);
    Vcmin(j,1)=bw*dmmin(j)*fvmin(j);

    %---Inverkan av normalkraft
    if Nvmax(j)>0
        Vptmax(j,1)=0.1*Nvmax(j);
        if Vptmax(j)<0
            Vptmax(j,1)=0;
        else
            Vptmax(j,1)=Vptmax(j);
        end
    else
        Vptmax(j,1)=0;
    end

    if Nvmin(j)>0
        Vptmin(j,1)=0.1*Nvmin(j);
        if Vptmin(j)<0
            Vptmin(j,1)=0;
        else
            Vptmin(j,1)=Vptmin(j);
        end
    end
end

```

APPENDIX E 6 (6)

```
end
else
    Vptmin(j,1)=0;
end

%Vrdmax(j,1)=Vcmax(j)-Vptmax(j);%+Vsmax(j);
%Vrdmin(j,1)=Vcmin(j)-Vptmin(j);%+Vsmin(j);
end

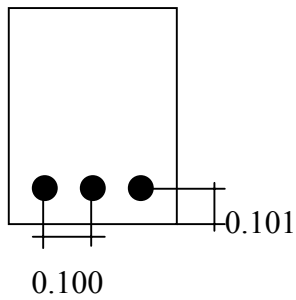
Vdmax=[1217.8 1186.2 1186.2 1033.9 960.0 709.2 451.9 192.6 -46.9 -
274.8 -502.7 -542.6 -684.4 -684.4 -742.2]*1000;
Vdmin=[890.4 863.7 863.7 736.6 676 466.9 249.6 22.6 -228 -494.2 -
764.1 -811.4 -981 -981 -1050.8]*1000;

V=[Vcmax Vcmin Vptmax Vptmin Vdmax Vdmin]
Vsmax=abs(Vdmax)-(Vcmax-Vptmax);
Vsmin=abs(Vdmin)-(Vcmin-Vptmin);
Vs=[Vsmax Vsmin]

plotparmaxC=['-', 'b', 'x'];
plotparminC=['-', 'm', '*'];
plotparmaxD=['-', 'k', 'x'];
plotparminD=['-', 'r', '*'];
plotparmaxS=['-', 'g', 'x'];
plotparminS=['-', 'c', '*'];
hold on
plot(z,Vcmax,plotparmaxC)
plot(z,Vcmin,plotparminC)
plot(z,Vdmax,plotparmaxD)
plot(z,Vdmin,plotparminD)
plot(z,Vsmax,plotparmaxS)
plot(z,Vsmin,plotparminS)
%axis('ij')
xlim([0,20.44])
ylim([-2e6,2e6])
legend('Vcmax', 'Vcmin', 'Vdmax', 'Vdmin', 'Vsmax', 'Vsmin')
grid on
xlabel('z [m]')
ylabel('V [N]')
hold off
abs(Vdmax)
abs(Vdmin)
```

Beräkning av c

$M > 0$, dvs dragen i underkant



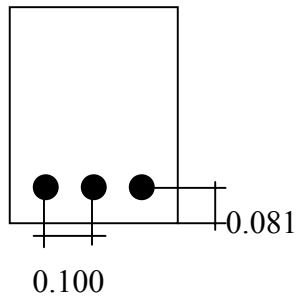
$$c_s = 0.100 - 2 \cdot \frac{0.032}{2} = 0.093$$

$$\Rightarrow 0.5 \cdot c_s = 0.034$$

$$c_1 = 0.101 - \frac{0.032}{2} = 0.085$$

$$c = \min \begin{pmatrix} 0.5 \cdot c_s \\ c_1 \end{pmatrix} = 0.034$$

$M < 0$, dvs dragen i överkant



c_s se ovan

$$c_1 = 0.081 - \frac{0.032}{2} = 0.065$$

$$c = \min \begin{pmatrix} 0.5 \cdot c_s \\ c_1 \end{pmatrix} = 0.034$$

det vill säga det c som är minst blir 0.034 m och har använts i beräkningarna

Indata GeoUtanIso

0.00E+00	3.07E-01	3.07E-01	1.80E+00	2.56E+00	5.11E+00
	7.67E+00	1.02E+01	1.28E+01	1.53E+01	1.79E+01
	1.83E+01	1.98E+01	1.98E+01	2.04E+01	
1.80E+00	1.70E+00	1.70E+00	1.20E+00	1.20E+00	1.20E+00
	1.20E+00	1.20E+00	1.20E+00	1.20E+00	1.20E+00
	1.20E+00	1.70E+00	1.70E+00	1.90E+00	
1.80E+00	1.70E+00	1.58E+00	1.08E+00	1.08E+00	1.08E+00
	1.08E+00	1.08E+00	1.08E+00	1.08E+00	1.08E+00
	1.08E+00	1.58E+00	1.70E+00	1.90E+00	
1.80E+00	1.70E+00	1.60E+00	1.10E+00	1.10E+00	1.10E+00
	1.10E+00	1.10E+00	1.10E+00	1.10E+00	1.10E+00
	1.10E+00	1.61E+00	1.70E+00	1.90E+00	
1.80E+00	1.70E+00	1.57E+00	1.07E+00	1.07E+00	1.07E+00
	1.07E+00	1.07E+00	1.07E+00	1.07E+00	1.07E+00
	1.07E+00	1.57E+00	1.70E+00	1.90E+00	
1.70E+00	1.60E+00	1.60E+00	1.10E+00	1.10E+00	1.10E+00
	1.10E+00	1.10E+00	1.10E+00	1.10E+00	1.10E+00
	1.10E+00	1.60E+00	1.60E+00	1.80E+00	
1.62E+00	1.52E+00	1.52E+00	1.02E+00	1.02E+00	1.02E+00
	1.02E+00	1.02E+00	1.02E+00	1.02E+00	1.02E+00
	1.02E+00	1.52E+00	1.52E+00	1.72E+00	
1.54E+00	1.44E+00	1.44E+00	9.39E-01	9.39E-01	9.39E-01
	9.39E-01	9.39E-01	9.39E-01	9.39E-01	9.39E-01
	9.37E-01	1.44E+00	1.44E+00	1.64E+00	
1.72E+00	1.62E+00	1.50E+00	9.98E-01	9.98E-01	9.98E-01
	9.98E-01	9.98E-01	9.98E-01	9.98E-01	9.98E-01
	9.96E-01	1.50E+00	1.62E+00	1.82E+00	
1.64E+00	1.54E+00	1.42E+00	9.18E-01	9.18E-01	9.18E-01
	9.18E-01	9.18E-01	9.18E-01	9.18E-01	9.18E-01
	9.16E-01	1.42E+00	1.54E+00	1.74E+00	
1.56E+00	1.46E+00	1.34E+00	8.38E-01	8.38E-01	8.38E-01
	8.38E-01	8.38E-01	8.38E-01	8.38E-01	8.38E-01
	8.36E-01	1.34E+00	1.46E+00	1.66E+00	
1.72E+00	1.62E+00	1.52E+00	1.02E+00	1.02E+00	1.02E+00
	1.02E+00	1.02E+00	1.02E+00	1.02E+00	1.02E+00
	1.02E+00	1.52E+00	1.62E+00	1.82E+00	
1.64E+00	1.54E+00	1.44E+00	9.42E-01	9.42E-01	9.42E-01
	9.42E-01	9.42E-01	9.42E-01	9.42E-01	9.42E-01
	9.40E-01	1.44E+00	1.54E+00	1.74E+00	
1.56E+00	1.46E+00	1.36E+00	8.62E-01	8.62E-01	8.62E-01
	8.62E-01	8.62E-01	8.62E-01	8.62E-01	8.62E-01
	8.60E-01	1.36E+00	1.46E+00	1.66E+00	

APPENDIX C 2 (6)

1.72E+00	1.62E+00	1.49E+00	9.89E-01	9.89E-01	9.89E-01
9.89E-01	9.89E-01	9.89E-01	9.89E-01	9.89E-01	9.89E-01
9.87E-01	1.49E+00	1.62E+00	1.82E+00		
1.64E+00	1.54E+00	1.41E+00	9.09E-01	9.09E-01	9.09E-01
9.09E-01	9.09E-01	9.09E-01	9.09E-01	9.09E-01	9.09E-01
9.07E-01	1.41E+00	1.54E+00	1.74E+00		
1.56E+00	1.46E+00	1.33E+00	8.29E-01	8.29E-01	8.29E-01
8.29E-01	8.29E-01	8.29E-01	8.29E-01	8.29E-01	8.29E-01
8.27E-01	1.33E+00	1.46E+00	1.66E+00		

Rad 1 z-koord

Rad 2 höjd på tvärsnittet

Rad 3 reducerad höjd pga bortspjälkning lastfall 1

Rad 4 reducerad höjd pga bortspjälkning lastfall 2

Rad 5 reducerad höjd pga bortspjälkning lastfall 3

Rad 6 d1 avstånd till första armeringslagret från ök

Rad 7 d2 avstånd till andra armeringslagret från ök

Rad 8 d3 avstånd till tredje armeringslagret från ök

Rad 9 d1' avstånd till första armeringslagret från uk lastfall 1

Rad 10 d2' avstånd till andra armeringslagret från uk lastfall 1

Rad 11 d3' avstånd till tredje armeringslagret från uk lastfall 1

Rad 12 d1' avstånd till första armeringslagret från uk lastfall 2

Rad 13 d2' avstånd till andra armeringslagret från uk lastfall 2

Rad 14 d3' avstånd till tredje armeringslagret från uk lastfall 2

Rad 15 d1' avstånd till första armeringslagret från uk lastfall 3

Rad 16 d2' avstånd till andra armeringslagret från uk lastfall 3

Rad 17 d3' avstånd till tredje armeringslagret från uk lastfall 3

Indata GeoMedIso

0.00E+00	3.07E-01	3.07E-01	1.80E+00	2.56E+00	5.11E+00
	7.67E+00	1.02E+01	1.28E+01	1.53E+01	1.79E+01
	1.83E+01	1.98E+01	1.98E+01	2.04E+01	
1.80E+00	1.70E+00	1.70E+00	1.20E+00	1.20E+00	1.20E+00
	1.20E+00	1.20E+00	1.20E+00	1.20E+00	1.20E+00
	1.20E+00	1.70E+00	1.70E+00	1.90E+00	
1.70E+00	1.60E+00	1.60E+00	1.10E+00	1.10E+00	1.10E+00
	1.10E+00	1.10E+00	1.10E+00	1.10E+00	1.10E+00
	1.10E+00	1.60E+00	1.60E+00	1.80E+00	
1.62E+00	1.52E+00	1.52E+00	1.02E+00	1.02E+00	1.02E+00
	1.02E+00	1.02E+00	1.02E+00	1.02E+00	1.02E+00
	1.02E+00	1.52E+00	1.52E+00	1.72E+00	
1.54E+00	1.44E+00	1.44E+00	9.39E-01	9.39E-01	9.39E-01
	9.39E-01	9.39E-01	9.39E-01	9.39E-01	9.39E-01
	9.37E-01	1.44E+00	1.44E+00	1.64E+00	
1.72E+00	1.62E+00	1.62E+00	1.12E+00	1.12E+00	1.12E+00
	1.12E+00	1.12E+00	1.12E+00	1.12E+00	1.12E+00
	1.12E+00	1.62E+00	1.62E+00	1.82E+00	
1.64E+00	1.54E+00	1.54E+00	1.04E+00	1.04E+00	1.04E+00
	1.04E+00	1.04E+00	1.04E+00	1.04E+00	1.04E+00
	1.04E+00	1.54E+00	1.54E+00	1.74E+00	
1.56E+00	1.46E+00	1.46E+00	9.59E-01	9.59E-01	9.59E-01
	9.59E-01	9.59E-01	9.59E-01	9.59E-01	9.59E-01
	9.57E-01	1.46E+00	1.46E+00	1.66E+00	

Rad 1 z-koord

Rad 2 höjd på tvärsnittet

Rad 3 d1 avstånd till första armeringslagret från ök

Rad 4 d2 avstånd till andra armeringslagret från ök

Rad 5 d3 avstånd till tredje armeringslagret från ök

Rad 6 d1' avstånd till första armeringslagret från uk

Rad 7 d2' avstånd till andra armeringslagret från uk

Rad 8 d3' avstånd till tredje armeringslagret från uk

APPENDIX C 4 (6)

Indata MoN

-1.41E+03	-1.30E+03	-1.30E+03	-7.87E+02	-5.58E+02	3.15E+02
1.78E+03	2.56E+03	2.80E+03	2.32E+03	1.36E+03	
1.33E+03	1.17E+03	1.17E+03	1.07E+03		
-2.68E+02	-2.68E+02	-2.68E+02	-2.68E+02	-2.68E+02	-5.70E+02
-3.50E+02	-2.54E+02	1.30E+02	1.38E+02	3.88E+02	
3.88E+02	3.88E+02	3.88E+02	3.88E+02		
-6.52E+03	-6.07E+03	-6.07E+03	-4.02E+03	-3.10E+03	-7.37E+02
4.90E+01	5.76E+02	5.82E+02	2.97E+02	-5.64E+02	-
9.47E+02	-2.42E+03	-2.42E+03	-3.09E+03		
1.31E+02	1.31E+02	1.31E+02	1.32E+02	1.33E+02	3.14E+02
8.90E+01	8.50E+01	-3.63E+02	-3.63E+02	-5.74E+02	-
5.74E+02	-5.74E+02	-5.74E+02	-5.73E+02		

Rad 1 Mmax

Rad 2 Ntillh

Rad 3 Mmin

Rad 4 Ntillh

Indata fst

0.000E+00 2.347E+02 4.298E+02

4.217E+02 4.629E+02 4.792E+02

0.000E+00 2.962E+02 4.680E+02

4.470E+02 4.797E+02 4.904E+02

0.000E+00 2.171E+02 3.840E+02

3.944E+02 4.588E+02 4.766E+02

Rad 1 GT-kurvan utan isolering

Rad 2 GT-kurvan med isolering

Rad 3 RWS-kurvan utan isolering

Rad 4 RWS-kurvan med isolering

Rad 5 Citytunnelkurvan utan isolering

Rad 6 Citytunnelkurvan med isolering

APPENDIX C 6 (6)

Indata fct

7.98E-02 9.27E-01 1.35E+00

1.34E+00 1.50E+00 1.60E+00

1.99E-01 1.14E+00 1.53E+00

1.41E+00 1.60E+00 1.66E+00

8.62E-02 8.67E-01 1.28E+00

1.30E+00 1.48E+00 1.58E+00

Rad 1 GT-kurvan utan isolering

Rad 2 GT-kurvan med isolering

Rad 3 RWS-kurvan utan isolering

Rad 4 RWS-kurvan med isolering

Rad 5 Citytunnelkurvan utan isolering

Rad 6 Citytunnelkurvan med isolering

Beräkning av det kritiska snittet

Temperaturfördelning i betongen, GT-kurvan utan isolering

$$x=0.12115 \text{ \%Gissa}$$

$$\text{temp}=11271*x^6 - 49620*x^5 + 88308*x^4 - 81682*x^3 + 41830*x^2 - 11431*x + 1348.4$$

Temperaturfördelning i betongen, RWS-kurvan utan isolering

$$x=0.09681 \text{ \%Gissa}$$

$$\text{temp}=15614*x^6 - 69771*x^5 + 124850*x^4 - 113952*x^3 + 55655*x^2 - 13723*x + 1350$$

Temperaturfördelning i betongen, Citytunnel-kurvan utan isolering

$$x=0.130012 \text{ \%Gissa}$$

$$\text{temp}=7765.1*x^6 - 34784*x^5 + 63671*x^4 - 61529*x^3 + 33585*x^2 - 9984.6*x + 1298.7$$

```
MEMORY PRE=32 SOLVIA=56

DATABASE CREATE

HEAD 'EXJOB, ANALYS AV BRANDLAST: KURVA GT (UTAN ISOLERING). HL
160204'

SET MODE=BATCH
SET ECHOPRINT=YES ERRORLIMIT=10

T-MASTER MODEX=EXECUTE NSTEP=240 DT=60
T-ANALYSIS TRANSIENT

PRINTOUT MIN

SYSTEM 1 TYPE=CAR

COORDINATES SYSTEM=1
ENTRIES NODE      Y      Z
      1  0.000  0.000
      2  3.600  0.000
      3  4.800  0.000
      4  4.800  1.000
      5  3.600  1.000
      6  0.000  1.000
*
*
*
* Luft
T-MATERIAL 3 CONDUCTION K=0.025 SPECIFICHEAT=1.2E3
*
* Betong
T-MATERIAL 1 CONDUCTION K=1.7 SPECIFICHEAT=2.11E6
*
* Brandisolering
*T-MATERIAL 2 CONDUCTION K=0.16 SPECIFICHEAT=0.6E6
*
*
* ELEMENTGRUPP 1: BETONGKONSTRUKTIONEN
*
EGROUP 1 PLANE STRAIN MATERIAL=1
GSURFACE N1=2 N2=3 N3=4 N4=5 EL1=10 EL2=11 NODES=8
*
* ELEMENTGRUPP 2: BRANDISOLERING 30mm
*
*EGROUP 2 PLANE STRAIN MATERIAL=2
*GSURFACE N1=3 N2=4 N3=8 N4=7 EL1=5 EL2=11 NODES=8
*
* ELEMENTGRUPP 3: MITTCELLER (LUFT)
*
EGROUP 3 PLANE STRAIN MATERIAL=3
GSURFACE N1=1 N2=2 N3=5 N4=6 EL1=10 EL2=11 NODES=8
*
*
T-INITIAL TEMPERATURE INPUT=SURFACE
*
1 2 5 6 20 20 20 20
2 3 4 5 20 20 20 20
*
```

APPENDIX A 2(6)

```
T-LOADS TEMPERATURE INPUT=LINE
3 4 1 1 1
*
TIMEFUNCTION 1
* time(sec) temp
    0      20.000
   300    1350.000
   4500    1350.000
   7200    1200.000
  14400     0.000
*
SOLVIA-TEMP
END
```

```

MEMORY PRE=32 SOLVIA=56

DATABASE CREATE

HEAD 'EXJOB, ANALYS AV BRANDLAST: KURVA RWS (UTAN ISOLERING). HL
050204'

SET MODE=BATCH
SET ECHOPRINT=YES ERRORLIMIT=10

T-MASTER MODEX=EXECUTE NSTEP=240 DT=60
T-ANALYSIS TRANSIENT

PRINTOUT MIN

SYSTEM 1 TYPE=CAR

COORDINATES SYSTEM=1
ENTRIES NODE      Y      Z
      1    0.000    0.000
      2    3.600    0.000
      3    4.800    0.000
      4    4.800    1.000
      5    3.600    1.000
      6    0.000    1.000
*
*
*
* Luft
T-MATERIAL 3 CONDUCTION K=0.025 SPECIFICHEAT=1.2E3
*
* Betong
T-MATERIAL 1 CONDUCTION K=1.7 SPECIFICHEAT=2.11E6
*
* Brandisolering
*T-MATERIAL 2 CONDUCTION K=0.16 SPECIFICHEAT=0.6E6
*
*
* ELEMENTGRUPP 1: BETONGKONSTRUKTIONEN
*
EGROUP 1 PLANE STRAIN MATERIAL=1
GSURFACE N1=2 N2=3 N3=4 N4=5 EL1=10 EL2=11 NODES=8
*
* ELEMENTGRUPP 2: BRANDISOLERING 30mm
*
*EGROUP 2 PLANE STRAIN MATERIAL=2
*GSURFACE N1=3 N2=4 N3=8 N4=7 EL1=5 EL2=11 NODES=8
*
* ELEMENTGRUPP 3: MITTCELLER (LUFT)
*
EGROUP 3 PLANE STRAIN MATERIAL=3
GSURFACE N1=1 N2=2 N3=5 N4=6 EL1=10 EL2=11 NODES=8
*
*
T-INITIAL TEMPERATURE INPUT=SURFACE
*
1 2 5 6 20 20 20 20
2 3 4 5 20 20 20 20
*

```

APPENDIX A 4(6)

T-LOADS TEMPERATURE INPUT=LINE

3 4 1 1 1

*

TIMEFUNCTION 1

* time(sec) temp

0 20.000

1200 1260.000

1800 1300.000

3600 1350.000

5400 1300.000

7200 1200.000

14400 0.000

*

SOLVIA-TEMP

END

MEMORY PRE=32 SOLVIA=56

DATABASE CREATE

HEAD 'EXJOB, ANALYS AV BRANDLAST: KURVA CITYTUNNELKURVAN (UTAN ISOLERING). HL 120204'

SET MODE=BATCH

SET ECHOPRINT=YES ERRORLIMIT=10

T-MASTER MODEX=EXECUTE NSTEP=300 DT=60

T-ANALYSIS TRANSIENT

PRINTOUT MIN

SYSTEM 1 TYPE=CAR

COORDINATES SYSTEM=1

ENTRIES	NODE	Y	Z
1		0.000	0.000
2		3.600	0.000
3		4.800	0.000
4		4.800	1.000
5		3.600	1.000
6		0.000	1.000

*

*

*

* Luft

T-MATERIAL 3 CONDUCTION K=0.025 SPECIFICHEAT=1.2E3

*

* Betong

T-MATERIAL 1 CONDUCTION K=1.7 SPECIFICHEAT=2.11E6

*

* Brandisolering

*T-MATERIAL 2 CONDUCTION K=0.16 SPECIFICHEAT=0.6E6

*

*

* ELEMENTGRUPP 1: BETONGKONSTRUKTIONEN

*

EGROUP 1 PLANE STRAIN MATERIAL=1

GSURFACE N1=2 N2=3 N3=4 N4=5 EL1=10 EL2=11 NODES=8

*

* ELEMENTGRUPP 2: BRANDISOLERING 30mm

*

*EGROUP 2 PLANE STRAIN MATERIAL=2

*GSURFACE N1=3 N2=4 N3=8 N4=7 EL1=5 EL2=11 NODES=8

*

* ELEMENTGRUPP 3: MITTCELLEN (LUFT)

*

EGROUP 3 PLANE STRAIN MATERIAL=3

GSURFACE N1=1 N2=2 N3=5 N4=6 EL1=10 EL2=11 NODES=8

*

*

T-INITIAL TEMPERATURE INPUT=SURFACE

*

1 2 5 6 20 20 20 20

2 3 4 5 20 20 20 20

*

APPENDIX A 6(6)

T-LOADS TEMPERATURE INPUT=LINE

3 4 1 1 1

*

TIMEFUNCTION 1

* time(sec) temp

0 20.000

900 900.000

3600 1100.000

5400 1200.000

9000 1260.000

10800 1300.000

12600 700.000

14400 400.000

16200 250.000

18000 170.000

*

SOLVIA-TEMP

END

Handberäkningar

KONTROLL AV SNITT 8 LASTFALL 1

$$M_{\max} = 2560 \text{ kNm}$$

$$d_1 = 1,10 \text{ m}$$

$$d_2 = 1,02 \text{ m}$$

$$d_3 = 0,939 \text{ m}$$

Antag att det behövs tre lager armering.

$$A_{s1} = 0,0064 \text{ m}^2$$

$$A_{s2} = 0,0064 \text{ m}^2$$

$$A_{s3} = \text{sökt}$$

$$f_{st1} = 0 \text{ MPa}$$

$$f_{st2} = 234,7 \text{ MPa}$$

$$f_{st3} = 429,8 \text{ MPa}$$

$$A_{s3} = \frac{M_{\max} - \overbrace{0,9 \cdot d_1 \cdot A_{s1} \cdot f_{st1}}^{=0} - 0,9 \cdot d_2 \cdot A_{s2} \cdot f_{st2}}{0,9 \cdot d_3 \cdot f_{st3}} =$$

$$= \frac{2560 \cdot 10^3 - 0,9 \cdot 1,02 \cdot 0,0064 \cdot 234,7 \cdot 10^6}{0,9 \cdot 0,939 \cdot 429,8 \cdot 10^6} =$$

$$= \frac{2560 \cdot 10^3 - 1,38 \cdot 10^6}{150,86 \cdot 10^6} = 0,0078$$

OK!