

Forskning

SKI – PERSPEKTIV

Bakgrund

Inneslutningen utgör den yttre barriären mot utsläpp av radioaktiva ämnen till omgivningen i händelse av svåra haverier. Ett sådant svårt haveri utgör till exempel ett brott i de större rörledningarna i inneslutningen. I händelse av ett rörbrott kan dels rörslag, dels andra laster såsom flödeslaster uppstå, vilka kan träffa innerväggen på inneslutningen och eventuellt vålla skador på dess täthetsfunktion. Storleken på dessa laster beror av bland annat tryck- och temperatur i systemet och rördimensionen samt övrig konstruktion såsom rörbrottsförankringar som kan mer eller mindre mildra effekten av det aktuella rörslaget.

Ett annat funktionskrav på inneslutningen är att den skall fungera som biologiskt strålskydd kring reaktorn och till denna anslutna rör och övriga komponenter som innesluter radioaktiva ämnen. Detta funktionskrav är enligt de säkerhetstekniska analyserna för kärnreaktorerna ständigt aktuellt, inte bara vid svåra haverier.

SKI har efter de inträffade händelserna med bland annat den korroderade toroiden i PS kupolens fläns i Forsmark 1 (1997) och korroderade tätplåten i Barsebäck 2 (1993) startat en utredning med syfte att dels bilda ett samlat underlag för SKI:s bedömningar i samband med eventuella frågeställningar som kan inträffa i framtiden, dels försäkra sig om att inneslutningen uppfyller dagens moderna konstruktionskrav. Denna fas av utredningen bedrivs med fokus på, förutom kemiska och andra degraderingar i betong- och stålkomponenterna som inneslutningen utgörs av, att identifiera eventuella hot mot inneslutningens täthetsfunktion från direkta rörslag vid tänkta rörbrott. Som en del i problematiken kring rörslag och dess effekter på strukturer har föreliggande utredning genomförts.

SKI:s syfte

Syftet med detta projekt har varit att få en helhetsbeskrivning av både de traditionella och de mer moderna analysmetoderna för utvärdering av verkan från rörslag och missiler på strukturer såsom innerytan på reaktorinneslutningen, samt att om möjligt beskriva eventuella begränsningar och osäkerheter med respektive metoder.

Resultat

I utredningen har olika typer av missillaster och rörslag och de traditionella beräkningsmetoderna för utvärdering av dynamiska verkan mellan dessa och träffade strukturer gått igenom. Därvid gjorda förenklingar och dess möjliga effekter har beskrivits. Vidare har de mera moderna sätten att beakta samma typ av fenomen översiktligt presenterats och osäkerheterna i dessa berörts. En slutsats från utredningen är att de mer moderna beräkningsmetoderna, vilka bygger på datorbaserade numeriska beräkningsmetoder (FEM), ger på ett mera adekvat och integrerat sätt effektiva möjligheter att studera rörslag mot strukturer. De flesta av de brister som identifierats vid analyser med de traditionella metoderna, vilka utgör relativt enkla empiriska samband uppställda utifrån ballistiska försök inom militärindustrin, kan elimineras med de moderna metoderna. Emellertid påpekas att de nya beräkningsmetoderna behöver i vissa avseenden verifieras mot experiment. Vidare påpekas i utredningen att antagandena om tidsförloppet hos det brustna röret och materialmodellen för betongarmerade strukturer behöver studeras närmare.

Fortsatt verksamhet

De nya beräkningsmetoderna ger jämfört med de traditionella empiriska sambanden möjligheter att på ett mera noggrant och komplett sätt analysera snabba dynamiska lasters verkan på komplexa strukturer.

Det har tidigare inom en annan studie, se nedan, verifierats att det föreligger potentiella hot mot inneslutningens tätande skal på grund av rörslog. Det verifierades även i denna utredning att de analyser som en gång i tiden eventuellt gjorts för att ta hänsyn till missiler och rörslog utgår från sådana förenklade empiriska samband som de som gåtts igenom i denna utredning. Mot bakgrund av i dessa identifierade begränsningar och osäkerheter, vars verkan är svårbedömd, är det motiverat med nya verifierande konstruktionsanalyser med mer moderna metoder. Detta för att förvissa sig om att forfarande tillräckligt konservativa resultat ur säkerhetssynpunkt föreligger i de fall rörslog eller missiler skulle kunna göra ett allvarligt hot mot en för säkerheten väsentlig komponent.

Den nya datorbaserade tekniken har numera uppnått sådan mognad att den, trots nämnda osäkerheter och otillräcklig experimentell verifiering, utgör ett i många fall bättre alternativ än de traditionella metoderna. Inverkan av de i utredningen nämnda kvarvarande osäkerheterna med de nya beräkningsmetoderna går att analysera genom känslighetsstudier, och därigenom erhålla ett mått på osäkerheterna i slutresultatet.

SKI finner i dagsläget därför inga omdelbara behov av ytterligare forsknings-och utredningsinsatser för att mer ingående belysa beräkningsproblematiken kring rörslog eller verkan av missiler.

Effekten på SKI:s verksamhet

Delutredningen ingår, som framgått ovan, i en mera omfattande utredning kring inneslutningsfrågor.

Projektinformation

SKI:s projekthandläggare: Gabriel Barslivo
Projektnummer: 14.42-001111/00182

Andra projekt som rör reaktorinneslutningsfrågor är:

Utredning angående potentiella hot mot inneslutningars täthet på grund av rörslog från tänkta rörbrott i ång- och matarvattenledningar, SwedPower AB/Arne Landström, SKI Rapport 01:7

14:42-991028/99188 – Kungliga Tekniska Högskolan, Institutionen för byggnadskonstruktion – Livslängdsfrågor för spännarmering i spännarmerade betongkonstruktioner. Första fasen av projektet beräknas bli klar under 2001.

Aging Degradation of Concrete Structures in Nuclear Power Plants, Mark J. Do and Alan D. Chocki, SKI-report 94:15.

Forskning

Sammanfattning

Analys av dynamiska effekter i kärntekniska anläggningar till följd av missiler och andra typer av stötlaster inkluderar flera frågeställningar av komplicerad natur. Under det expansiva uppbyggnadsskedet av de svenska kärnkraftsanläggningarna på 1970-talet och början av 1980-talet fanns inga rationella datorbaserade analysmetoder tillgängliga för beskrivning av dessa händelseförlopp. Istället var man huvudsakligen hänvisad till förenklade empiriska metoder, ofta baserade på erfarenheter från ballistiska experiment utförda inom den amerikanska militärindustrin. Moderna analysmetoder baserade på finit elementteknik, har under senare år allt oftare börjat användas inom branschen för hantering av dynamiska lasteffekter. Dessa metoder gör det möjligt att eliminera ett flertal av de brister som är förknippade med de traditionella metoderna.

På uppdrag av Statens Kärnkraftsinspektion har Scanscot Technology genomfört en översyn av traditionella och moderna beräkningsmetoder för hantering av missilgenererade lasteffekter i kärntekniska anläggningar. I uppdraget har ingått att tydliggöra de fördelar och möjligheter som kan uppnås med hjälp av moderna analysmetoder, men även identifiera de nya osäkerhetsmoment som införs. Traditionellt inom kärnkraftsindustrin har acceptanskriterierna avseende dynamiska effekter fokuserats på säkerhetsfunktionerna hos system och komponenter. Ofta har motsvarande krav på byggnadskonstruktionerna förbisetts eller behandlats utifrån helt andra säkerhetskriterier. Ett ytterligare syfte med uppdraget har därför varit att försöka skapa ett helhetsperspektiv för byggnader, system och komponenter avseende de acceptanskriterier som bör gälla vid utvärdering av dynamiska lasteffekter till följd av händelser av olyckskaraktär.

I denna rapport beskrivs de olika typer av missillaster som måste beaktas inom ramen för postulerade händelser av olyckskaraktär vid kärntekniska anläggningar. Vidare behandlas speciella frågeställningar beträffande lasteffekter och acceptanskriterier för säkerhetssystem och byggnadskonstruktioner. I rapporten beskrivs de metoder som traditionellt har använts för beräkning av missilgenererade lasteffekter. Vidare redovisas de förutsättningar som ligger till grund för tillämpningen av dessa metoder, samt hur metoderna har vidareutvecklats. Studien fokuserar på moderna deterministiska analysmetoder, samt dessa metoders möjligheter och begränsningar. Inom ramen för arbetet diskuteras därför även viktigare frågeställningar avseende metodernas tillämpning, med förslag till fördjupade studier i syfte att verifiera och vidareutveckla dessa.

Traditionella analysmetoder är relativt rationella att använda för enkla system, medan de för komplicerade strukturer kan vara mycket tidskrävande. Vid studie av mer komplicerade system måste oftast flera tveksamma konservativa antaganden göras, vilket kan resultera i att avgörande beteenden inte fångas in och att felaktiga slutsatser därmed dras. I vissa fall kan detta medföra en minskad total anläggningssäkerhet eftersom allt för konservativa antaganden kan innebära att rörbrottsförankringar eller missilskydd installeras på ett sätt som försvårar inspektion, kontroll och underhåll av anläggningens säkerhetssystem. Felaktigt placerade förankringar/skydd kan också ge upphov till ett icke önskat beteende hos rörbrottsmissilen.

De flesta av de brister som identifierats vid användning av de traditionella metoderna kan elimineras genom att utnyttja moderna analysmetoder baserade på finit element teknik. Framförallt bör då nämnas möjligheterna att göra kvalitetsmässigt bättre beskrivningar av geometri, kontakt och material. Genom att skapa modeller där samtliga

för analysen styrande förutsättningar ingår erhålls ett tydligt helhetsperspektiv av händelseförloppet, allt från missilens beteende och islagsförloppet till beräkning av

lasteffekterna. Analysresultatet utgör sedan ett utmärkt underlag för verifiering av att ställda acceptanskriterier är uppfyllda. För den händelse att analysen utvisar att konsekvenserna med avseende på anläggningens säkerhet inte är acceptabla kan beräkningsmodellen användas för bedömning av lämpligt åtgärdsbehov. Vald åtgärd kan sedan införas och verifieras i en förnyad analys.

Sammanfattningsvis kan klarläggas att de senaste årens utveckling av finita elementtekniken öppnar upp för nya möjligheter att simulera missilgenererade händelseförlopp. De nya deterministiska analysmetoderna möjliggör en

- tydligare och bättre beskrivning av missilers beteende.
- bättre beskrivning av interaktionen mellan missil och träffad struktur.
- hög kvalitet i den hållfasthetstekniska verifieringen av ställda acceptanskriterier.
- rationell teknik för optimering av säkerhetshöjande åtgärder.
- effektivare planering av framtida underhållsbehov.
- ökad allmän förståelse för missilers beteende samt de effekter dessa förorsakar.

Finita elementmetoden är en kunskapsintensiv och krävande teknik. Användaren måste därför vara väl insatt i såväl den grundläggande teorin som de specifika tillämpningarna som används i den aktuella analysen. Felaktig användning av en metod leder otvivelaktigt till icke tillförlitliga eller direkt felaktiga resultat. Härvid avses i första hand risk för felaktiga antaganden i struktur- och materialmodeller, feltolkning av analysresultat och okunskap om programvarornas begränsningar.

Med stöd av moderna analysmetoder baserade på finita elementtekniken kan resultat av hög kvalitet erhållas. I syfte att öka teknikens bredd och tillämpning bör emellertid ytterligare insatser göras, exempelvis att verifiera analysmetoderna mot utförda experiment, samt att generellt vidareutveckla och effektivisera tekniken.

Abstract

Analysis of impact load effects to be accounted for in nuclear power plant engineering includes several complicated issues. During the expansive build up of the Swedish nuclear power plants in the 1970s and the beginning of the 1980s, no rational computer based analysis methods were available to handle these types of events. Simplified empirical methods, based on experiences from ballistic experiments within the American military industry, constituted the basic analysis tools. Modern analysis methods based on the finite element technique have during recent years been used more often within the nuclear power plant industry. These methods have made it possible to eliminate several of the shortages associated with the traditional methods of analysis.

On behalf of the Swedish Nuclear Inspectorate, Scanscot Technology has performed a review of the traditional and modern analysis methods aimed at handling missile impact in nuclear power plants. Emphasis has been put on the advantages and possibilities that can be achieved by using modern analysis methods, but also to identify and define new uncertainties that may arise. Acceptance criteria regarding dynamic load effects have traditionally been focused on safety-related systems and components. Generally, corresponding demands on safety-related structures have been overlooked or treated on the basis of other acceptance criteria. Therefore, another aim of this commission is to create a comprehensive perspective for safety-related systems, components and structures regarding the acceptance criteria to be applied for evaluation of dynamic load effects in the case of accidental events.

In this report the various types of impact loads, which should be regarded within the scope of postulated accidental events in nuclear power plants, are described. Furthermore, special issues regarding load effects and acceptance criteria for safety-related systems and structures are treated. The traditional methods of determining impact load effects are described. In addition, the conditions for application of these methods and how these methods have been developed are discussed. The study is focused on modern deterministic analysis methods, the potential of these methods and their limitations. Within the scope of this work more important issues regarding the application of these methods are discussed, together with some suggestions aimed at verifying and further developing these methods.

Traditional analysis methods are rational when applied to more simple systems, but all the more tedious when applied to complicated structural systems. When dealing with more irregular systems, many dubious conservative assumptions have to be made. This can lead to a situation where critical behavior can not be defined, resulting in wrong conclusions being drawn. In some cases this will result in a reduced total safety of the whole plant. Too many conservative assumptions may lead to pipe whip restraints and missile shields being installed in such a way that it will make it more difficult to inspect, control and maintain the safety systems of the plant. Inappropriate situated restraints/shields may also give rise to an undesired behavior of the missile.

Most of the shortcomings associated with the traditional methods of analysis can be eliminated by using modern analysis methods, based on finite element technique. Especially worth mentioning are the possibilities to create state of the art quality descriptions of geometry, contact and material. By creating a model that includes all the governing parameters for an analysis, the user will have an overall perspective and comprehensive view of the course of events, from the missile behavior to the impact and calculation of the load effects. The analysis results will then constitute an excellent basis for verification of the acceptance criteria. In the event of the analysis results

indicating that the consequences with regards to plant safety are not acceptable, the model can be used for the assessment of appropriate strengthening measures. Chosen reinforcement measures can then be validated in a renewed analysis.

In conclusion, it can be stated that the development of the finite element technique in recent years has opened up new possibilities to simulate impact load events. The modern deterministic methods of analysis provide

- superior simulations of missile behavior
- superior descriptions of missile impact events
- high quality structural verifications
- a rational technique for optimization of strengthening measures
- more effective planning of future maintenance
- enhanced general understanding of missile behavior and impact effects

The finite element method is a knowledge intensive and demanding technique. The user must be familiar with the theoretical basis as well as the specific applications applied in the analysis at hand. Incorrect application of the method will without doubt result in unreliable or incorrect results. For example, risk of wrongly made assumptions in structure and material models, wrongly interpreted analysis results and ignorance of the programs limitations.

By using modern analysis methods based on finite element technology, high quality results can be achieved. With the aim to increase the use and application of this technology, efforts should be made to validate the analysis methods with regard to executed experiments as well as generally developing and refining the technology.

Innehållsförteckning

1.	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte	1
1.3	Omfattning	2
2.	Kriterier för analys av missilpåverkan	3
2.1	Allmänt	3
2.2	Händelser av olyckskaraktär	3
2.2.1	Allmänt	3
2.2.2	Naturkatastrofer	3
2.2.3	Kollisioner	4
2.2.4	Krigspåverkan	4
2.2.5	Processrelaterade olyckor	4
2.3	Missillaster	4
2.3.1	Allmänt om laster av olyckskaraktär	4
2.3.2	Missillaster i kärntekniska anläggningar	5
2.4	Lasteffekter och acceptanskriterier	9
2.4.1	Missilgenererade lasteffekter	9
2.4.2	Övergripande säkerhetsfilosofi	11
2.4.3	Acceptanskriterier för byggnadskonstruktioner	11
3.	Traditionella metoder för analys av dynamiska effekter	13
3.1	Allmänt	13
3.2	Generell översyn	13
3.2.1	Styrande parametrar	13
3.2.2	Grundläggande samband	14
3.2.3	Lokal strukturrespons	18
3.2.4	Global strukturrespons	30
3.3	Speciella hänsynstagande för vissa missiltyper	42
3.3.1	Allmänt	42
3.3.2	Tornados	42
3.3.3	Störtande flygplan	43
3.3.4	Hanteringsmissöden	44
3.3.5	Rörbrott	46
3.4	Traditionella analysmetoders tillämplighet	51

4.	Moderna analysmetoder baserade på finit elementteknik.....	53
4.1	Allmänt	53
4.2	Metodik vid analys av missilgenererade lasteffekter.....	54
4.2.1	Allmänt	54
4.2.2	Analysens syfte och avgränsningar.....	54
4.2.3	Beskrivning av inledande händelse.....	54
4.2.4	Identifiering av säkerhetssystem och acceptanskriterier.....	55
4.2.5	Generering av strukturmodell samt strukturanalys	55
4.2.6	Säkerhetsvärdering-åtgärdsbehov	56
4.3	Aspekter på strukturmodellering och analys.....	56
4.3.1	Allmänt	56
4.3.2	Geometri	56
4.3.3	Material	60
4.3.4	Laster	62
4.3.5	Randvillkor	67
4.3.6	Kontaktvillkor	68
4.3.7	Känslighetsanalyser	68
4.4	Säkerhetsvärdering.....	69
4.5	Moderna analysmetoders möjligheter och begränsningar	72
4.5.1	Begränsningar i traditionell beräkningsmetodik.....	72
4.5.2	Fördelar med användning av moderna analysmetoder	73
4.5.3	Moderna analysmetoders begränsningar	73
4.6	Förslag till fördjupade studier.....	74
4.6.1	Allmänt	74
4.6.2	Några exempel på möjliga vidareutvecklingsprojekt	74
5.	Referenser	77

1. Inledning

1.1 Bakgrund

Krav på beaktande av missilgenererade lasteffekter i kärntekniska anläggningar har sitt ursprung i General Design Criteria 2 och 4 (GDC-2 och GDC-4) i appendix A av det amerikanska lagavsnittet Title 10 Code of Federal Regulations Part 50 (10 CFR Part 50) [1]. I GDC-2 anges att byggnader, system och komponenter viktiga för anläggningens säkerhet ska konstrueras för att motstå effekten av exceptionella naturfenomen, exempelvis tornados, utan förlust av sina säkerhetsfunktioner. I GDC-4 utvidgas kravbilden till att säkerställa att byggnader, system och komponenter viktiga för anläggningens säkerhet skyddas mot dynamiska effekter till följd av haverier i anläggningsutrustning och händelser som uppstår utanför anläggningen. Såsom exempel anges i GDC-4 specifikt effekter orsakade av missiler, rörslog och utströmmande vätskor. I 3 kap. 1 § av Statens kärnkraftsinspektions föreskrifter om säkerhet i vissa kärntekniska anläggningar (SKIFS 1998:1) [2] anges att svenska kärntekniska anläggningar skall ha en tålighet mot sådana händelser som kan påverka barriärernas eller djupförsvarets säkerhetsfunktion. Såsom exempel på sådana händelser anges i kommentarerna till nämnda paragraf bl.a. rörbrott och transienter som i säkerhetsanalyser har visats påverka säkerhetsfunktionen på ett ej försumbart sätt.

Analys av dynamiska effekter i kärntekniska anläggningar till följd av missiler och andra typer av stötlaster inkluderar flera frågeställningar av komplicerad natur. Under det expansiva uppbyggnadsskedet av de svenska kärnkraftsanläggningarna på 1970-talet och början av 1980-talet fanns inga rationella datorbaserade analysmetoder tillgängliga för beskrivning av dessa händelseförlopp. Istället var man hänvisade till förenklade empiriska metoder, ofta baserade på erfarenheter från utförda ballistiska experiment inom den amerikanska militärindustrin. Emellertid kan det starkt ifrågasättas om dessa metoder kan anses vara giltiga vid analys av ett flertal av de händelser inom kärnteknikområdet som inkluderar missilpåverkan. Exempelvis används empiriska formler baserade på experimentella data som tagits fram för missiler med mycket högre islagshastigheter än vad som kan anses gälla för typiska missiler som kan uppstå i kärntekniska anläggningar. Vidare uppstår tveksamheter huruvida dessa metoder på ett vederhäftigt sätt förmår beakta missilers deformerbarhet och interaktionen mellan missiler och påverkade konstruktionsdelar.

Moderna analysmetoder baserade på finita elementmetoden, har under senare år allt oftare börjat användas inom branschen för hantering av dynamiska lasteffekter. Dessa metoder gör det möjligt att eliminera ett flertal av de brister som är förknippade med de traditionella metoderna. Emellertid innebär användandet av mer avancerade analysmetoder att nya osäkerhetsmoment införs. Härvid avses i första hand risk för felaktiga antaganden i struktur- och materialmodeller, feltolkning av analysresultat och okunskap om programvarornas begränsningar.

1.2 Syfte

Syftet med denna rapport är att översiktligt beskriva de traditionella beräkningsmetoderna för hantering av missilgenererade lasteffekter i kärntekniska anläggningar, samt identifiera deras tillämplighet. Syftet är även att tydliggöra vilka fördelar som kan

uppnås med hjälp av moderna analysmetoder, men även de begränsningar och osäkerheter som därvid måste observeras.

Traditionellt inom kärnkraftsindustrin har acceptanskriterierna avseende dynamiska effekter fokuserats på säkerhetsfunktionerna hos system och komponenter. Ofta har därvid motsvarande krav på byggnadskonstruktionerna förbisetts eller behandlats utifrån helt andra säkerhetskriterier. Ett ytterligare syfte med rapporten är därför att försöka skapa ett helhetsperspektiv för byggnader, system och komponenter avseende de acceptanskriterier som bör gälla vid utvärdering av dynamiska lasteffekter till följd av händelser av olyckskaraktär.

1.3 Omfattning

Rapporten beskriver de olika typer av missillaster som måste beaktas inom ramen för postulerade händelser vid kärntekniska anläggningar. Vidare behandlas speciella frågeställningar beträffande lasteffekter och acceptanskriterier för säkerhetssystem och byggnadskonstruktioner.

I studien beskrivs de metoder som traditionellt har använts för beräkning av missilgenererade lasteffekter. Vidare redovisas de förutsättningar som ligger till grund för tillämpningen av dessa metoder, samt hur metoderna har vidareutvecklats.

Studien fokuserar på moderna deterministiska analysmetoder, samt dessa metoders möjligheter och begränsningar. Inom ramen för arbetet diskuteras därför även viktigare frågeställningar avseende metodernas tillämpning, med förslag till fördjupade studier i syfte att verifiera och vidareutveckla dessa.

2. Kriterier för analys av missilpåverkan

2.1 Allmänt

Kärntekniska anläggningar ska dimensioneras under beaktande av möjliga driftstillstånd som kan uppstå under anläggningens livstid. Härvid avses situationer och inledande händelser som omfattar olika driftlägen från normal drift till hypotetiska haverier som medför att svåra skador i härden uppstår. En balanserad riskprofil uppnås genom att man indelar olika driftssituationer, händelser och händelsesekvenser i klasser, där varje klass innefattar händelser inom ett givet frekvensintervall. Inom varje sådan händelseklass gäller sedan samma acceptanskriterier för samtliga händelser.

I det följande kommer händelsebegreppet att användas för att erhålla en konsistent arbetsmetodik vid uppställning av acceptanskriterier för byggnader, system och komponenter. Det är härvid viktigt att konsekvent skilja på *händelse*, *last* och *lasteffekt*. Exempelvis kan *händelsen* rörbrott förorsaka *laster* i form av övertryck i byggnadsutrymmen, reaktionskrafter i brottytan och laster mot objekt som jetstrålen träffar. Dessa laster medför *lasteffekter* i form av exempelvis interna krafter och moment i byggnadskonstruktionerna och vibrationer i reaktortanken.

Missilpåverkan uppstår till följd av någon händelse av olyckskaraktär. En generell översikt och en kategorisering av sådana händelser presenteras i avsnitt 2.2. I avsnitt 2.3 redovisas olika aspekter avseende de olyckslaster som kan uppstå i samband med denna typ av händelser, samt specifikt de laster av missiltyp som är relaterade till kärnteknisk verksamhet. Avsnitt 2.4 behandlar viktigare frågeställningar avseende lasteffekter och acceptanskriterier för byggnadskonstruktioner vid kärntekniska anläggningar.

2.2 Händelser av olyckskaraktär

2.2.1 Allmänt

Vid uppförande av bygg- och anläggningskonstruktioner måste ofta lasteffekter till följd av extrema händelser av olyckskaraktär beaktas. Sådana händelser kategoriseras här nedan till fyra olika huvudgrupper;

- naturkatastrofer
- kollisioner
- krigspåverkan
- processrelaterade olyckor

Dessa huvudgrupper av händelser beskrivs nedan i avsnitt 2.2.2 till 2.2.5.

2.2.2 Naturkatastrofer

Med naturkatastrofer avses händelser förorsakade av extrem naturpåverkan av typ jordbävning, översvämning och tornados. I detta sammanhang avses exceptionella händelser med mycket låg sannolikhet för inträffande och ej vindlaster och vattenståndsvariationer inom ramen för variabla lastvärden som i genomsnitt överskrider en gång vart femtionde år.

2.2.3 Kollisioner

Kollisioner mot byggnader och anläggningar avser yttre påverkan orsakade av tåg, vägfordon, fartyg och flygplan. Denna typ av påverkan är i första hand aktuell för brokonstruktioner men även för byggnader i närhet av trafikleder med hög trafikintensitet.

2.2.4 Krigspåverkan

Byggnader som ska upprätthålla viktigare funktioner i händelse av krigstillstånd, exempelvis skyddsrum och försvarsledningscentraler, måste som regel dimensioneras för en viss form av krigspåverkan. Detta gäller även för anläggningar som skulle kunna skadas på ett sätt som medför stor fara för den omgivande miljön. I första hand avses härvid kärnkraftverk och dammkonstruktioner. Påverkan som måste beaktas utgörs av detonationer och krigsmissiler.

2.2.5 Processrelaterade olyckor

Ofta måste vid dimensionering av industriella anläggningar olyckshändelser till följd av processrelaterad verksamhet i anläggningen beaktas. Härvid avses översvämningar, explosioner, hanteringsmissöden vid tunga lyft, rörbrott eller haveri i roterande maskiner.

2.3 Missillaster

2.3.1 Allmänt om laster av olyckskaraktär

Händelser av olyckskaraktär förorsakar laster som är statiska eller dynamiska. Laster får anses vara statiska om den tidsberoende lasteffekten kan anses vara försumbar. Som exempel på olyckslaster som kan behandlas statistiskt kan framförallt nämnas vattentryck till följd av översvämning. Vindlasten har en dynamisk påverkan, men denna beaktas normalt statistiskt genom att lasten påförs en dynamisk förstöringsfaktor. Dock måste för vissa konstruktioner, exempelvis skorstenar, snedkabelbroar och hängbroar vindlastens dynamiska inverkan beaktas noggrannare med användning av strukturdynamisk analys.

För de flesta laster som kan uppstå vid olyckshändelser gäller att lastens dynamiska, tidsberoende effekt måste beaktas. De dynamiska lasterna kan delas in i två huvudkategorier; *periodiska* och *icke-periodiska*.

Periodiska laster som uppstår i byggnader kan i första hand hänföras till obalans i roterande maskiner. Eftersom denna typ av last endast är relaterad till komfortkrav behandlas den inte vidare i detta sammanhang.

De *icke-periodiska* lasterna kan antingen ha kort eller lång varaktighet. Laster med kort varaktighet kan antingen hänföras till *impulsiva laster*, exempelvis explosioner eller till *stötlaster* som är karakteristiska så till vida att de kan beskrivas i form av kinetisk energi vid islag. Exempel på stötlaster är påkörningslast mellan fordon och byggnader, islagslast vid tunga lyft, missillast vid rörbrott eller vid brott i roterande maskiner.

Den viktigaste icke-periodiska lasten med lång varaktighet är jordbävning.

Den orsakande händelsen kan utlösa flera samtidigt verkande laster på konstruktionerna. Exempelvis kan en explosion i en anläggning orsaka laster i form av tryckskillnader

över byggnadsdelar, men även laster från missiler som bildats vid explosionen. Effekterna till följd av de olika lasterna måste därför kombineras och utvärderas mot uppställda acceptanskriterier för den inträffade händelsen.

2.3.2 Missillaster i kärntekniska anläggningar

2.3.2.1 Allmänt

I föregående avsnitt beskrevs generella aspekter avseende laster av olyckskaraktär och därtill hörande olyckslaster som måste beaktas vid dimensionering av byggnader. I detta avsnitt avgränsas problemställningen till en fokusering på de händelser som förorsakar olyckslaster av missiltyp i kärntekniska anläggningar. Respektive händelse beskrivs och missillasterna definieras. Vidare anges övriga ingående laster samt hur dessa ska kombineras vid utvärdering av lasteffekterna för den aktuella händelsen.

Missiler kan uppstå till följd av ett flertal olika händelser av olyckskaraktär. Dessa missiler kan därför ha mycket varierande egenskaper beroende på karaktären på den inledande händelsen. För att ge en uppfattning om spännvidden av dessa egenskaper redovisas typiska värden på karakteristiska parametrar för olika typer av missiler i tabell 2.1 nedan.

Vilka missiler som behöver beaktas för en specifik kärnteknisk anläggning avgörs av för anläggningen gällande förutsättningar, normer och bestämmelser, samt utifrån en bedömning av sannolikheten för att en viss typ av missil kan ge upphov till oacceptabel skada på en struktur, komponent eller ett system.

Denna sannolikhet kan bestämmas med hjälp av en probabilistisk analys, där den händelsesekvens som ger upphov till en oacceptabel påverkan studeras. Denna sekvens kan till exempel för en turbinmissil innehålla följande delar; den händelse som genererar missilen, missilens transport före islag samt islaget i studerad struktur med tillhörande strukturrepons. Tillåten sannolikhetsnivå bestäms ytterst av vilken risk man kan acceptera. Med vetskap om konsekvensen av den oacceptabla påverkan och tillåten risk kan maximal sannolikhetsnivå bestämmas. Om, för ovanstående exempel, sannolikheten för ett islag i studerad struktur är för hög, kan man utföra en deterministisk analys för att bestämma strukturens respons för den aktuella missilen.

Denna rapport behandlar deterministiska analysmetoder av konstruktionsdelar i kärntekniska anläggningar som träffas av missiler typiska för denna typ av anläggningar. Den anger däremot ej hur bestämning av aktuella missil typer (och tillhörande styrande parametrar) för en specifik anläggning ska ske. Dessa antas istället vara kända genom postulat eller på annat sätt, till exempel genom att de finns redovisade i den kärntekniska anläggningens säkerhetsrapport, SAR.

Inom ramen för kärnteknisk verksamhet kan säkerhetsanalyser krävas för ett antal tänkbara missilgenererande händelser. Dessa händelser beskrivs i följande avsnitt;

Kap	Händelse
2.3.2.2	Tornados
2.3.2.3	Störtande flygplan
2.3.2.4	Hanteringsmissöden
2.3.2.5	Explosioner
2.3.2.6	Rörbrott
2.3.2.7	Haveri i roterande utrustningar

Typ av missil	Exempel	Styvhet	Vikt	Hastighet
Tornadogenererade missiler	Stålstång	Hård	~ 5 kg	~ 40 – 100 m/s
	Trästolpe	Mjuk	~ 500 kg	
	Rör av stål	Medium	~ 50 – 350 kg	
	Bil	Mjuk	~ 2 ton	
Stora, deformerbara missiler	Flygplan	Mjuk	~ 2 – 55 ton	~ 65 – 100 m/s
	Fordon	Mjuk	~ 2 – 20 ton	~ 10 – 100 m/s
Rörbrottsgenererad missil	Rör eller rörkrök	Hård eller mjuk	~ 50 – 2000 kg	~ 5 – 100 m/s
Missil genererad av roterande maskin	Fragment från roterande del	Hård	~ 50 – 3500 kg	~ 90 – 250 m/s
	Fragment från kåpa		~ 50 – 1500 kg	
Tappade föremål	Bränsleflaska Reaktortanklock Demonterbara interndelar	Hård eller mjuk	~ 0.5 – 150 ton	~ 0.3 – 25 m/s

Tabell 2.1 Karakteristiska parametrar för vissa typer av missiler genererade vid kärntekniska anläggningar.

Här nedan redogörs för några ytterligare begrepp i samband med missiler i kärntekniska anläggningar.

Missiler kan indelas i *mjuka* eller *hårda* missiler. För en hård missil är missilens deformerbarhet relativt liten i förhållande till den träffade strukturens deformation.

Förutom ovan redovisade missiler, så kallade *primära* missiler, kan även *sekundära* missiler uppstå. Detta sker när en struktur, komponent eller ett system träffas av en missil på ett sådant sätt att en ny missil genereras. Detta kan till exempel ske när en betongvägg träffas av en primär missil på ett sådant sätt att ett betongsegment stöts loss från baksidan och i sin tur flyger iväg och därmed kan skada säkerhetsrelaterad utrustning.

2.3.2.2 Tornados

Tornados, virvelstormar eller andra orkanliknande fenomen kan förorsaka exceptionella vindhastigheter utöver angivna värden enligt nationell standard. Detta beaktas för vissa av de svenska kärntekniska anläggningarna. I sådana fall kan missiler i form av kringflygande föremål förorsaka laster på byggnaden, som måste beaktas i kombination med vindhastighetstrycket.

Tornadogenererade missiler kan vara av flera olika typer med mycket olika beteende, från hårda odeformerbara till stora mycket deformerbara missiler. Exempelvis kan nämnas massiva stålstänger, stålrör, trästolpar och bilar, se tabell 2.1.

2.3.2.3 Störtande flygplan

Om den kärntekniska anläggningen är placerad tillräckligt nära civila flygleder, militära flygövningsområden eller på annat sätt kan påverkas av flygtrafik, kan missiler av typen störtande flygplan behöva beaktas.

Störtande flygplan kan generera i princip två olika typer av missiler, dels mycket deformerbara i form av själva flygplanskroppen, dels hårda missiler i form av till exempel motorerna.

2.3.2.4 Hanteringsmissöden

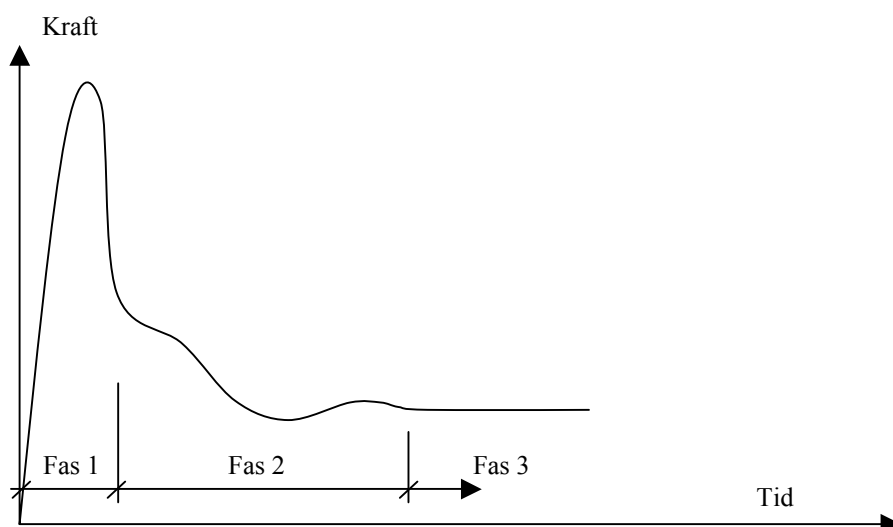
Händelsen hanteringsmissöde innefattar de olika missöden som kan uppstå vid kärntekniska anläggningar och som har en icke försumbar inverkan på reaktorsäkerheten och den radiologiska omgivningssäkerheten.

Härvid avses framförallt missöden vid tunga lyft på reaktorhallsplanet, som förorsakar missiler exempelvis vid hantering av bränsletransportbehållare, inneslutningslock, reaktortanklock och interndelar.

Även de olika missöden som kan uppstå vid transport av bränsletransportflaskan inom anläggningen kan förorsaka missilgenererade lasteffekter, både med avseende på tungt lyft upp till reaktorhallsplanet och påkörning vid transport av flaskan med specialfordon. Även påkörning med andra typer av fordon kan behöva beaktas.

2.3.2.5 Explosioner

Med explosioner avses i detta sammanhang tryckalstrande händelser av typ gas-explosioner, rämnande trycksatta gastankar, kemiska explosioner i vätskecisterner och detonationer vid krigspåverkan. Samtliga dessa händelser kan medföra att missiler bildas. Lasteffekten från missilen ska kombineras med motsvarande effekt av det förhöjda trycket. I figur 2.1 ges ett exempel på impulslast (av förhöjt tryck) från en explosion i det fria.



Figur 2.1 Exempel på impulslast vid explosion i det fria.

2.3.2.6 Rörbrott

Krav på hänsynstagande till rörbrott i kärntekniska anläggningar har sitt ursprung i GDC-4 i appendix A i 10 CFR Part 50 [1]. Detta lagavsnitt har givits en detaljerad uttolkning i den skrivning som ges i avsnitt 3.6.1-3 av Standard Review Plan (SRP) [3]. En ännu bättre sammanhållen och konsistent tolkning har senare givits i American Nuclear Society 58.2-1988 (ANSI/ANS-58.2-1988) [4].

Rörbrott måste beaktas både innanför och utanför reaktorinneslutningen. Händelsen rörbrott förorsakar ett antal på strukturen verkande tidsberoende laster, som måste kombineras vid utvärdering av om acceptanskriterierna är uppfyllda. De dynamiska laster som uppkommer kan schematiskt beskrivas enligt tabell 2.2. Lastbeteckningar enligt Dimensioneringsregler för byggnader (DRB:1998) [5] används.

Händelse	Last	Beteckning
Rörbrott	Transient över- eller undertryck	P_a
	Jetstrålkraft	R_{tj}
	Missillast	R_{rm}
	Rörstödsreaktionskraft	R_{rr}

Tabell 2.2 Dynamiska laster till följd av rörbrott.

Vid rörbrott innanför inneslutningen tillkommer även pooldynamiska laster i kondensationsbassängen till följd av blåsning med system 314 och 316. Vid lastkombinering ska angivna dynamiska laster i tabell 2.2 även kombineras med de på strukturen verkande permanenta och variabla lasterna, exempelvis egentyngd, spännkraft, hydrostatiska vattentryck och nyttig last.

Nuvarande regler föreskriver att byggnader, system och komponenter viktiga för säkerheten ska konstrueras för att motstå effekterna av ett postulerat rörbrott i högenergisystem. Ett sådant rörbrott ger upphov till en rörmissil. En undersökning av konsekvenserna av en rörmissil kan ske på principiellt två olika sätt, *källorienterad* respektive *målorienterad analys*. Källorienterad analys är det traditionella sättet att hantera missiler genererade av rörbrott. Här sker identifiering av rörbrottspositioner genom anvisningar och postulat uppställda i gällande regelverk. Rörbrott ansätts i dessa positioner varefter man analyserar vilken påverkan missilerna har på omkringliggande byggnader, system och komponenter. Vid en målorienterad studie startar man istället med att identifiera vilken (säkerhets)funktion som ska säkerställas. Därefter identifieras de härtill hörande farligaste positionerna för brott på rörsystem. Påverkan på studerat säkerhetssystem av rörbrott i dessa positioner analyseras sedan.

2.3.2.7 Haveri i roterande utrustning

Ett haveri i en roterande utrustning kan medföra att en missil bildas i form av ett lossnat fragment av den roterande konstruktionsdelen. De kan vara av primär eller sekundär typ. En primär missil består av den utslungade roterande maskindelen i sig medan en sekundär missil kan vara en del av maskinens kåpa som skickas iväg när den träffas av primärmissilen.

En missil från haveri i roterande utrustning kan erhålla en mycket hög hastighet, och därmed ha ett stort kinetiskt energiinnehåll med risk för skador på intilliggande byggnader, system och komponenter.

Missiler kan även genereras av utrustning som ej har roterande delar, till exempel trycksatta komponenter och system, förspända förband etc.

2.4 Lasteffekter och acceptanskriterier

2.4.1 Missilgenererade lasteffekter

Med *lasteffekt* avses den påverkan som uppstår i en konstruktion till följd av den påförda belastningen. Lasteffekten kan beskrivas i termer av spänning, böjmoment, vibration, etc., beroende på vilket acceptanskriterium som ska utvärderas.

Begreppet *lasteffekt* används vid utvärdering av de krav som anges för respektive gränstillstånd vid dimensionering av byggnadskonstruktioner enligt Boverkets Konstruktionsregler (BKR 94) [6] eller Eurocode Part 1 [7]. Detta begrepp kan även användas vid lastpåverkan på system och komponenter i kärntekniska anläggningar, vilket gör den fortsatta beskrivningen konsistent för byggnader, system och komponenter i kärntekniska anläggningar.

De lasteffekter som kan uppstå till följd av missillaster indelas traditionellt ofta i *lokala* och *globala* effekter.

Med *lokala* effekter avses lasteffekter i islagsområdets omedelbara närhet, med ett utbredningsområde motsvarande ungefär missilens storlek eller tjockleken av den träffade konstruktionsdelen. Lokala effekter anses vidare vara oberoende av de dynamiska egenskaperna hos den träffade konstruktionsdelen. Typiska lokala effekter anses vara splittring med kraterbildning på anslagssidan, penetration, utstötning av fragment från betongytan (sekundära missiler), genomslag eller fullständig genomstansning av en betongplugg, se tabell 2.3.

Med *globala* effekter avses strukturens globala respons, exempelvis strukturens totalstabilitet och vibrationspåverkan på system och komponenter, se tabell 2.3. Vid beräkning av globala effekter måste hänsyn tas till strukturens dynamiska egenskaper.

Indelningen i lokala och globala effekter har i första hand gjorts för att erhålla ett praktiskt sätt att hantera lasteffekterna i byggnadskonstruktionerna vid missilpåverkan. Man behövde göra förenklade antaganden för att kunna utnyttja empiriska formler för beräkning av lokala effekter och för att kunna beräkna den globala responsen med den beräkningsteknik som fanns tillgänglig på 1970- och 1980-talen. Emellertid finns det i själva verket en stark interaktion mellan den globala och lokala responsen, inte minst för de tunga, deformerbare missiler (rörmissiler, tappade föremål och tornadomissiler) som är aktuella i typiska kärnkraftverk. Användningen av denna kategorisering av lasteffekter kan därför medföra att man vid dimensionering för missillaster i många fall ställer upp allt för grova beräkningsförutsättningar, som resulterar i felaktiga slutsatser och konstruktionsåtgärder.

I samband med ny- och omkonstruktion bör en eventuell indelning i lokala och globala effekter genomföras med stor försiktighet. Förutsättningarna bör definieras noggrant och beräkningsmodellers och analysmetoders giltighet måste verifieras.

Typ av respons	Responsmekanism	Skada på strukturen	Kritisk skada ²⁾
Lokal respons	Lokal deformation	Splittring med kraterbildning på anslagssidan	Ingen ¹⁾
		Penetration	Ingen ¹⁾
		Genomslag	Skapande av primär missil (i det bakomliggande utrymmet) om den träffande missilen ej fångas upp
	Stötvåg	Utstötning på baksidan	Skapande av sekundära missiler
Global respons	Lokalt skjuvbrott (genomstansning)	Utstötning av genomgående brottkon	Skapande av sekundära missiler
	Böjning, skjuvning och membranverkan samt buckling	Brott, permanent deformation	Kollaps, överskridande av tillåtna deformationer
	Vibration	Skada på monterad utrustning	Ej tillåten skada på monterad utrustning

1) De fragment som lossar från träffad struktur är oftast så små och har tillräckligt lågt energiinnehåll för att antagas ej kunna skada intilliggande byggnadsdelar, system eller komponenter.

2) Utöver angivna skadefenomen kan ytterligare acceptanskriterier behöva uppfyllas, till exempel krav på täthet.

Tabell 2.3 Sammanställning över strukturrepons med avseende på missilbelastning.

Otillåten påverkan på säkerhetssystem av missiler kan förhindras genom fysisk *separation* av systemet från missilen, införandet av *redundanta system* separerade från varandra, användandet av *skyddande barriärer* och *missilskydd* samt att systemet i sig *klarar aktuell belastning*.

Vid fysisk separation är säkerhetssystemen placerade i utrymmen som ej kan nås av missiler. Säkerhetssystemen kan utföras redundanta och separerade från varandra på sådant sätt att endast ena kretsen slås ut av den händelse som genererar en missil. Konstruktionsdelar såsom väggar, bjälklag, pelare och balkar kan fungera som skyddande barriärer mellan missiler och säkerhetssystem. Barriärer och system kan även vara försedda med missilskydd som hindrar eller lindrar effekten av en missilträff. Missilskydden kan vara försedda med speciala energiabsorbenter. Vissa säkerhetsfunktioner, till exempel reaktorinneslutningen, kan dimensioneras för att kunna motstå en direkträff av en missil.

2.4.2 Övergripande säkerhetsfilosofi

Det helt övergripande konstruktionskravet för kärntekniska anläggningar är att uppkomsten av den inledande händelsen inte får medföra oacceptabla radiologiska konsekvenser för omgivningens hälsa och säkerhet. Detta övergripande krav kan definieras i underordnade krav som avser upprätthållande av integriteten hos RCPB, möjligheten till en säker avställning av anläggningen och upprätthållande av säkerhetsfunktionerna hos byggnadsdelar, system och komponenter.

I 10 CFR Part 50 [1] anges krav för licensiering av kärntekniska anläggningar i USA. I appendix A i 10 CFR Part 50 [1] anges minimikrav (General Design Criteria) som måste tillämpas för anläggningarna. I två av dessa kriterier, GDC-2 och GDC-4, anges specifika krav som avser beaktande av missilgenererade lasteffekter.

I GDC-2 anges att byggnader, system och komponenter viktiga för anläggningens säkerhet skall konstrueras för att kunna motstå effekter av naturfenomen typ jordbävningar, tornados, översvämningar, etc., utan förlust av sina säkerhetsfunktioner. Eftersom tornados kan förorsaka missiler är kriteriet tillämpligt i detta sammanhang.

I GDC-4 anges att byggnader, system och komponenter ska vara tillbörligt skyddade mot dynamiska effekter, inkluderande effekter från missiler, rörslag och utströmmande vätskor, som kan uppstå till följd av haveri i anläggningen eller på grund av händelser utanför anläggningen.

GDC-2 och GDC-4 är allmänt hållna och har därför uttolkats i olika dokument utfärdade av U.S. Nuclear Regulatory Commission (USNRC), till exempel i SRP [3] och Regulatory Guides. Härtill kommer tolkningar i olika industristandarder, till exempel från American Nuclear Society (ANS). I svenskt regelverk nämns rörbrott i SKIFS 1998:1 [2].

2.4.3 Acceptanskriterier för byggnadskonstruktioner

BKR 94 [6] innehåller föreskrifter och allmänna råd till Plan- och bygglagen (SFS 1987:10) [8]. Föreskrifterna i BKR är bindande och gäller fullt ut för nya byggnader och tillbyggnader som kräver bygglov. Föreskrifterna i BKR 94 [6] måste för byggnader vid kärntekniska anläggningar förtydligas och kompletteras med hänsyn till de speciella krav som ställs för att tillstånd ska medges till kärnteknisk verksamhet. Härvid avses i första hand krav på upprätthållande av reaktorinneslutningens integritet, men även krav på byggnadskonstruktioner för upprätthållande av säkerhetsfunktioner och integritet hos system och komponenter monterade i byggnaden. DRB:1998 [5] är ett dokument som är framtaget just i syfte att komplettera kravbilden i BKR 94 [6] vid ny- och omkonstruktion av byggnader som inrymmer kärnteknisk verksamhet.

Begreppet *olyckslast* i BKR 94 [6] orsakas av någon form av olyckshändelse, t.ex. påkörning eller explosion. Dessa laster är oönskade och inte knutna till konstruktionens funktion vid normal användning. En olyckslast som verkar på en konstruktion, exempelvis en last orsakad av en påkörning, kan ha en hel skala av värden, alltifrån små lastvärden vid lindriga fall till mycket stora värden vid allvarliga olyckshändelser. Påkörningslaster kan behandlas som variabla laster med låga värden eller med höga värden som då utvärderas som en olyckslast. På likartat sätt hanteras det specificerade konstruktionstrycket vid LOCA i DRB:1998 [5]. Konstruktionstrycket behandlas för inneslutningsväggen som variabel last i bruksgränstillståndet och det med faktorn 1.5

förhöjda trycket som variabel last i brottgränstillståndet, medan det s.k. öppningstrycket vid en RAMA-händelse behandlas som en olyckslast i brottgränstillståndet.

Enligt BKR 94 [6] kan man acceptera lokala skador då konstruktioner utsätts för olyckslast. Dock får den primära skadan inte medföra fortskridande ras och svår förstörelse för någon annan del av byggnaden än för det primära skadeområdet och det till detta angränsande området. För kärntekniska anläggningar kan samma acceptanskriterier gälla, dock med den skärpningen att den lokala skadan ej får medföra att säkerhetsfunktioner som krediteras vid den aktuella händelsen inte kan upprätthållas. Exempelvis kan missilskydd tillåtas förstöras och lokala genomstansningsbrott accepteras. Dock under förutsättning att det kan göras troligt att dessa skador inte primärt, eller sekundärt i form av sekundära missiler, medför att skador uppstår på system som måste upprätthålla funktion eller integritet vid den inträffade händelsen. Ej heller accepteras att skadorna kan medföra att otillåtet radioaktivt läckage till den omgivande miljön uppstår.

Varje säkerhetsfunktion tillgodoses av ett eller flera system under händelsen. Med system avses även byggnadsdelar som uppbär säkerhetsfunktioner. I detta sammanhang utsträcks begreppet säkerhetsfunktion till att avse både *funktion* och *integritet*. Detta har betydelse vid uppställning av acceptanskriterier för respektive system (byggnadsdel), eftersom kraven blir olika vid endast bibehållen integritet jämfört med upprätthållen funktion.

3. Traditionella metoder för analys av dynamiska effekter

3.1 Allmänt

I detta kapitel beskrivs de viktigaste traditionella metoderna för analys av dynamiska effekter orsakade av missiler i kärntekniska anläggningar. För denna typ av laster analyseras normalt både lokal och global strukturens respons. Vid lokal respons används traditionellt empiriska och semiempiriska samband kalibrerade mot experiment. Global respons bestäms analytiskt eller med hjälp av numerisk lösningsmetodik för dynamiska system som beskriver den träffade strukturen och eventuellt även missilen. Vid dessa analyser görs oftast konservativa antaganden för att förenkla beräkningarna. I detta kapitel beskrivs endast enklare numeriska lösningsmetoder av typen numerisk integration och liknande. Avancerade metoder såsom finit element teknik beskrivs i kapitel 4.

I avsnitt 3.2 presenteras en generell översyn av traditionella analysmetoder. I avsnitt 3.3 kompletteras med speciella hänsynstaganden för vissa missiltyper.

Redovisade metoder och tillhörande värden på parametrar är att betrakta som exempel på traditionella analysmetoder, och ej som dimensioneringshjälpmedel eller som ett urval av de mest lämpliga metoderna/parametrarna.

3.2 Generell översyn

3.2.1 Styrande parametrar

En missil som träffar en struktur utgör ett komplicerat samverkande system där både lokala och globala fenomen påverkar händelseförloppet.

Ett flertal parametrar hos missilen och den träffade strukturen samt förutsättningar vid islagsögonblicket styr vilken lasteffekt som erhålls. En sammanställning av de viktigaste av dessa parametrar redovisas i tabell 3.1 nedan.

I de traditionella analysmetoderna görs förenklningar och konservativa antaganden vad gäller de styrande parametrarna, för att man över huvud taget ska kunna studera problemet med en rimlig beräkningsinsats. De traditionella analysmetoderna är givetvis utvecklade under en tidsperiod då dagens moderna beräkningsmetoder, såsom avancerad FE-teknik, ej ännu var tekniskt eller kommersiellt mogna för denna typ av tillämpningar.

Vid traditionell missilanalys beaktas alltid missilens massa, medan man ofta försummar dess deformerbarhet och i vissa fall även dess spetsform. Vad gäller den träffade strukturen betraktas den i många fall som helt oeftergivlig, vilket är ett mycket grovt antagande för ett flertal av de typer av konstruktionselement som finns i kärntekniska anläggningar. Så gott som alltid förutsätts att missilen träffar vinkelrät mot den studerade strukturen och att missilens rörelseriktning sammanfaller med missilens längdriktning. Missilen antas vanligtvis ej rotera.

Betraktad del	Parameter
Missil	Massa Storlek Form Styvhet
Träffad struktur	Massa Geometri Upplagsförhållanden Material Styvhet Andra samtidigt verkande laster Läge av islag
Parametrar vid kontakt	Hastighet hos missil Missilens rörelseriktning Missilens orientering (i förhållande till rörelseriktningen) Missilens rotation Vinkel mellan träffad struktur och missilens rörelseriktning

Tabell 3.1 Parametrar som påverkar missilgenererade lasteffekter.

3.2.2 Grundläggande samband

En missil som träffar en struktur kan betraktas som två kolliderande kroppar, där den ena, missilen, är i rörelse före islag och den andra, strukturen är stillastående före islag. Ett flertal av de förenklingar och antaganden som görs vid traditionella analysmetoder utgår från detta betraktelsesätt.

De konservativa antaganden och förenklingar som beskrivits i föregående avsnitt vad gäller missilens rörelse och riktning omedelbart före islag innebär att kropparnas tyngdpunkter ligger på stötnormalen, att kontaktpunkternas relativa hastigheter är längs stötnormalen samt att stötnormalen är vinkelrät mot den träffade strukturen. Samtidigt antas att missilens längdriktning sammanfaller med stötnormalen. Därmed kan förloppet betraktas som en *rak central stöt* mellan två kroppar med utseende enligt figur 3.1 och 3.2.

Rörelsemängden för en kropp är produkten mellan dess massa och hastighet. Både rörelsemängden och hastigheten kan betraktas som vektorer. De har båda samma riktning. Om en kropp rör sig med en konstant hastighet är rörelsemängden oförändrad. För att ändra kroppens hastighet måste en yttre kraft påföras. Härav följer att om kroppens rörelsemängd ska ändras måste också en yttre kraft verka på kroppen. Det vill säga,

$$F = m \frac{dv}{dt} \text{ eller } Fdt = mdv \quad (3.1)$$

F = kraft

m = massa

v = hastighet

$t = \text{tid}$

En impuls definieras såsom,

$$F_I(t) = \int F dt \quad (3.2)$$

$F_I = \text{impuls}$

Om ekvation (3.1) integreras på båda sidor erhålls,

$$\int_{t_1}^{t_2} F dt = \int_u^v m dv \quad (3.3)$$

vilket med ekvation (3.2) insatt blir,

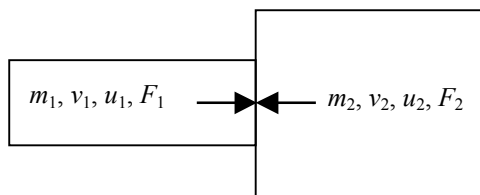
$$F_I(t) = m(v - u) \quad (3.4)$$

där u och v är hastigheterna vid tidpunkterna t_1 respektive t_2 . Om begynnelsehastigheten u är noll erhålls,

$$I = mv \quad (3.5)$$

det vill säga impulsen av en påförd kraft är lika med den förändring i rörelsemängd som den ger upphov till.

När två kroppar kolliderar utövar de under den tid de är i kontakt med varandra två lika stora motriktade krafter, eller impulser, mot varandra, se figur 3.1.



Figur 3.1 Två kolliderande kroppar med massorna m , hastigheterna u före islag och v efter islag samt kontaktkrafterna F .

Om inga andra yttre krafter verkar på kropparna kommer, enligt lagen om rörelsemängdens bevarande, rörelsemängden att vara konstant. Massförhållandet mellan de två kolliderande kropparna kan då bestämmas enligt nedan. Impulserna är, enligt ekvation (3.4),

$$F_{I1}(t) = m_1(v_1 - u_1) = \int F_1 dt \quad (3.6)$$

$$F_{I2}(t) = m_2(v_2 - u_2) = \int F_2 dt \quad (3.7)$$

m_1 och $m_2 =$ massa för kropp 1 respektive 2

v_1 och $v_2 =$ hastighet för kropp 1 respektive 2 efter islag

u_1 och $u_2 =$ hastighet för kropp 1 respektive 2 före islag

F_1 och $F_2 =$ kraft verkande mot kropp 1 respektive 2

Eftersom

$$\int F_1 dt + \int F_2 dt = 0 \quad (3.8)$$

fås massförhållandet uttryckt i hastighetsförändringen som,

$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{(v_1 - u_1)}{-(v_2 - u_2)} \quad (3.9)$$

Även om rörelsemängden bevaras vid en kollision så förloras energi vid ihopslaget, vilket kan beskrivas med restitutionskoefficienten e . Koefficienten e definieras såsom kvoten mellan kropparnas relativa hastighet efter islag och före islag,

$$e = \frac{(v_1 - v_2)}{-(u_1 - u_2)} \quad (3.10)$$

Om hastigheten före islag sätts till noll för den ena kroppen ($u_2 = 0$), vilket ju gäller då en missil träffar en struktur, fås ur ekvation (3.9),

$$m_1(v_1 - u_1) + m_2 v_2 = 0 \quad (3.11)$$

$$v_1 - v_2 = -e u_1 \quad (3.12)$$

och därmed blir

$$v_1 = \frac{u_1(m_1 - e m_2)}{(m_1 + m_2)} \quad (3.13)$$

$$v_2 = u_1 \left[\frac{(1 + e)m_1}{(m_2 + m_1)} \right] \quad (3.14)$$

Av ekvation (3.13) framgår att om $e m_2$ är större än m_1 blir v_1 negativ och missilen kommer därmed att röra sig ifrån strukturen efter islag, dvs den studsar mot den träffade strukturen. Om däremot $e m_2$ är mindre än m_1 kommer missilen och strukturen att röra sig i samma riktning efter islag (v_1 positiv).

Den kinetiska energin före islag är,

$$T_{före} = \frac{1}{2} m_1 u_1^2 \quad (3.15)$$

och efter islag, om missil och struktur rör sig åt samma håll,

$$T_{efter} = \frac{1}{2} (m_1 v_1^2 + m_2 v_2^2) \quad (3.16)$$

Skillnaden mellan kinetisk energi före och efter islag är,

$$T_{före} - T_{efter} = \frac{1}{2} m_1 u_1^2 - \frac{1}{2} (m_1 v_1^2 + m_2 v_2^2) \quad (3.17)$$

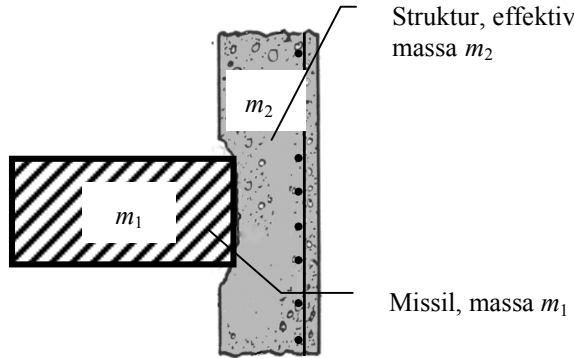
Efter insättning av ekvation (3.13) och (3.14) i (3.17) fås,

$$T_{före} - T_{efter} = T_{före} \left[\frac{m_1(1 - e^2)}{(m_1 + m_2)} \right] \quad (3.18)$$

Vid en helt elastisk stöt är $e = 1$, högerledet i ekvation (3.18) blir då noll, dvs ingen förlust av kinetisk energi sker vid islag. Ett värde på e mindre än 1 innebär en förlust av kinetisk energi. För en plastisk stöt sätts e till 0.

Övergå nu till att specifikt studera ett fall med en missil som träffar en struktur i anläggningen enligt figur 3.2.

m_1 och m_2 representerar missilens massa respektive effektiv medverkande massa hos den träffade strukturen. Strukturens effektiva massa beror på deformationen omedelbart efter islaget och motsvaras av hur stor del av den träffade strukturen som exciteras vid islaget. Missilens hastighet före islag betecknas u_1 och efter islag v_1 . Strukturens hastighet före islag, u_2 , är noll och efter islag v_2 .



Figur 3.2 Missil som träffar struktur.

För en penetrerande missil kan stöten (islaget) mot den träffade strukturen vanligen betraktas som plastisk. Därmed blir, enligt ekvation (3.13) och (3.14), v_1 lika med v_2 och missil och struktur följs åt efter islaget. Vid en plastisk stöt ger en energibetraktelse följande samband,

$$T_{mis} = V_{mis} + V_{pen} + T_{str} \quad (3.19)$$

där T_{mis} är missilens kinetiska energi just före islag, V_{mis} är töjningsenergin som absorberas i missilen vid islag, V_{pen} är energiförlust på grund av penetrationen in i den träffade strukturen och T_{str} är den kinetiska energi som absorberas av strukturen under islagsförloppet.

Missilens kinetiska energi just före islag är enligt ekvation (3.15),

$$T_{mis} = \frac{1}{2} m_1 u_1^2 \quad (3.20)$$

m_1 = missilens massa

u_1 = missilens hastighet precis före islag

och den kinetiska energin absorberad av strukturen efter islag är enligt ekvation (3.16),

$$T_{str} = \frac{1}{2} (m_1 + m_2) v_2^2 \quad (3.21)$$

m_2 = strukturens effektiva medverkande massa

v_2 = strukturens hastighet efter islag (lika med missilens hastighet)

Med hjälp av lagen om rörelsemängdens bevarande kan det visas (jämför ekvation (3.18)) att för en plastisk stöt är den kinetiska energin som absorberas av strukturen beroende av missilens kinetiska energi enligt följande samband,

$$T_{str} = \left(\frac{c_m}{1 + c_m} \right) T_{mis} \quad \text{där } c_m = \frac{m_1}{m_2} \quad (3.22)$$

dvs förhållandet mellan missilens massa och strukturens effektiva medverkande massa.

Den totala energi som då finns kvar för att penetrera strukturen lokalt är,

$$V_{pen} = \frac{T_{mis}}{1 + c_m} - V_{mis} \quad (3.23)$$

För att förenkla analysen vid lokal respons brukar man ofta anta en odeformerbar missil och en massiv, det vill säga oeftergivlig, struktur. Detta innebär att både V_{mis} och c_m sätts till noll i ekvation (3.23) och missilens hela kinetiska energi därmed används för att penetrera strukturen lokalt. Om en deformierbar missil eller en eftergivlig struktur beaktas i den lokala analysen medför det att den tillgängliga energin för att penetrera strukturen kommer att minska och att den lokala skadan därmed minskar.

På motsvarande sätt kan man, på säkra sidan, vid en global analys försumma energin som går åt för att deformera missilen och för att penetrera strukturen lokalt, och därmed anta att all energi måste upptas av den globala responsen. Störst krav på energiupptagningsförmåga erhålls om strukturens effektiva medverkande massa m_2 är liten, jämför ekvation (3.22).

Vad som ovan beskrivits gäller för en rak central stöt. Vid en *excentrisk stöt* blir förhållandena mer komplicerade. Förutom rörelsemängdslagen måste också lagen om rörelsemängdsmomentet tillämpas. Om friktion mellan kropparna försummas, dvs de antas vara glatta, gäller sambandet för restitutionskoefficienten e (ekvation (3.10)) om v_2-v_1 respektive u_1-u_2 betecknar normalkomponenterna av relativhastigheterna i stötpunkten.

3.2.3 Lokal strukturrepons

3.2.3.1 Betongkonstruktioner

3.2.3.1.1 Förutsättningar och skadefenomen

Beräkning av lokala skador på konstruktionsdelar av betong hanteras traditionellt med hjälp av empiriska eller semiempiriska/semianalytiska samband baserade på experiment. Dessa experiment är ursprungligen utförda inom militärindustrin. Det innebär att studerade missiler i princip är odeformerbara och utgörs av projektiler med relativt hög hastighet. Träffad struktur utgörs i princip av en helt oeftergivlig struktur. Aktuella missiler i kärntekniska anläggningar har i de allra flesta fall en lägre hastighet och är ofta deformerbara. Många av de träffade strukturerna i kärntekniska anläggningar är så slanka att de är att betrakta som eftergivliga. De ursprungliga experimenten har därför kompletterats med försök, som bättre stämmer överens med de förutsättningar som kan uppkomma i kärntekniska anläggningar, för att om möjligt verifiera eller modifiera de empiriska/semiempiriska sambanden så att de ska kunna anses vara tillämpliga även för denna typ av anläggningar.

Eftersom de flesta samband för lokal respons är baserade på försöksresultat måste vid användning och extrapolering av dessa ekvationer utanför aktuella testdata utföras med stor försiktighet.

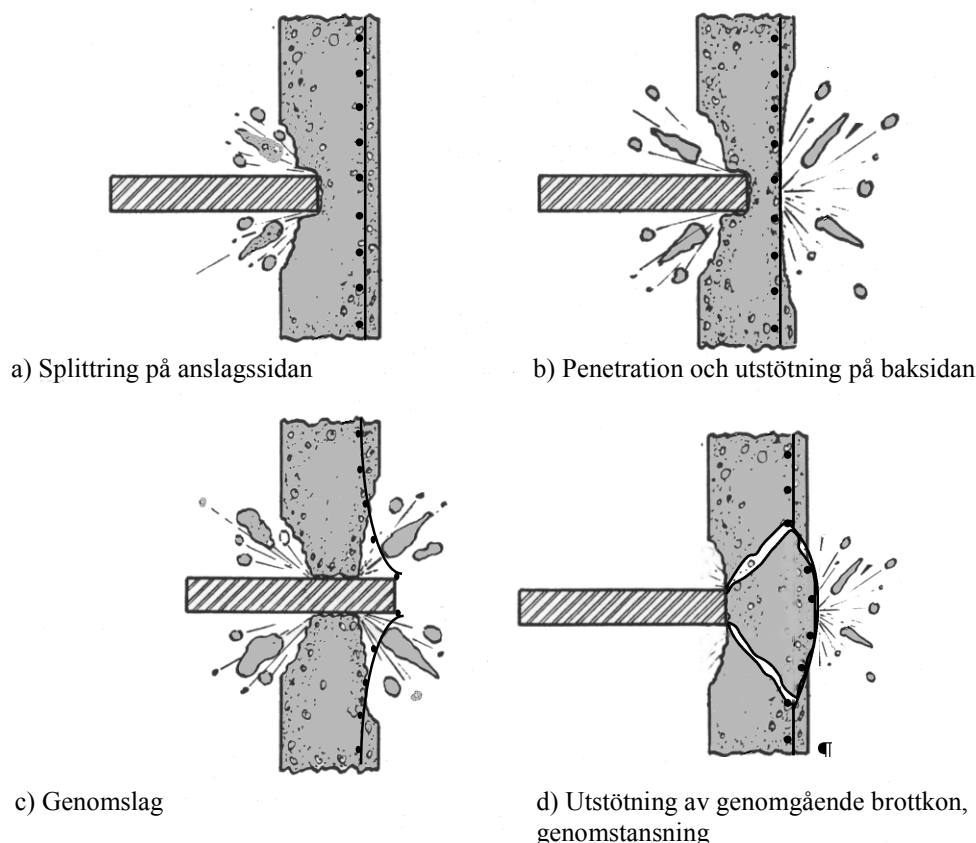
Lokala effekter på betongkonstruktioner kan uppdelas i splittring och kraterbildning på anslagssidan, penetration, utstötning på baksidan samt genomslag, se figur 3.3a-c. Som lokal skada brukar även räknas den utstötning av en lokal genomgående brottkon (genomstansningsbrott) som kan uppträda, se figur 3.3d.

För den händelse att hastigheten är låg hos missilen uppstår endast en grund krater. Denna är avsevärt större än missilens diameter. Vid högre hastigheter penetrerar

missilen betongen och om inträngningen är tillräckligt stor fastnar missilen i den träffade strukturen. Vid penetration orsakar missilen ett hål i strukturen med en diameter som är obetydligt större än missilens.

När missilen träffar strukturen bildas en stötvåg som reflekteras mot konstruktionens baksida. Denna stötvåg kan medföra utstötning av delar av betongkonstruktionen på baksidan av den träffade konstruktionsdelen. Detta utstötningsområde på baksidan är större än kraterbildningen på anslagssidan. De utstötta betongdelarna kan ha sådan storlek och hastighet att de i sin tur kan skada säkerhetsklassad utrustning. Därför kategoriseras dessa betongdelar också som missiler, så kallade sekundära missiler. Även utstötning av en genomgående brottkon, genomstansning, kan uppstå. Den utstötta betongkonen kan i vissa fall hållas på plats av konstruktionsdelens armering så att ingen sekundär missil bildas.

Om hastigheten hos missilen är tillräckligt hög kommer den att tränga igenom den träffade strukturen. Har den efter genomslaget fortfarande en hastighet framåt kan den skada säkerhetsklassad utrustning på baksidan av strukturen.



Figur 3.3 Exempel på lokala brottfenomen för betongkonstruktioner.

Här nedan studeras först splittring, penetration, utstötning samt genomslag och därefter genomstansning. Denna uppdelning genomförs på grund av att analyserna traditionellt har behandlats var för sig.

3.2.3.1.2 Samband för bestämning av lokal strukturrepons

I detta avsnitt redovisas olika samband för bestämning av lokal strukturrepons hos betongkonstruktioner. För ytterligare information se till exempel Bangash [9], Hellström [10], Kennedy [11] och UKEA [12].

De samband som är framtagna för bestämning av lokal respons utgår oftast från penetrationsdjupet, i en oändligt tjock betongkonstruktion, för betraktad missil. Därefter bestäms vanligen erforderlig tjocklek för att förhindra genomslag och utstötning med hjälp av en funktion som är beroende av beräknat penetrationsdjup.

En mängd olika samband för att bestämma den lokala responsen hos betong har framtagits. Redan på mitten av 1700-talet ställde *Robins* och *Euler* upp samband för bestämning av missilpenetration. En modifiering av Robins och Eulers ekvation gav upphov till *Poncelet's* ekvation, som har visat sig ge bättre överensstämmelse med försöksresultat än den ursprungliga ekvationen.

Under 1900-talet har ett antal moderna samband uppställts som bygger på eller har kalibrerats mot försöksresultat. Dessa samband förutsätter oftast att missilen är hård och träffad struktur odeformerbar. Bland andra kan följande formler nämnas; *modified Petry* formula, *Army Corps of Engineers* formula (ACE), *Amman and Whitney* formula, *Ballistic Research Laboratory* formula (BLC) och *modified National Defence Research Committee* formula (NDRC).

Ytterligare forskning har bedrivits och samband uppställts, till exempel *Chang* formula, *Degen* formula, *IRS* formula, *Bechtel* formula, *CEA-EDF* formula, *Hughes* formula, *Kar* formula, *Perry and Brown* formula, *Winfrith* model och *UK Atomic Energy Authority* (UKEA) guidelines.

Uppställda samband tar oftast hänsyn till missilens vikt (m), diameter (d), hastighet (u) och eventuellt dess spetsform (N) samt betongkonstruktionens tryckhållfasthet (f_{cc}), och i vissa fall även dess armeringsmängd (K). Konservativa antaganden har gjorts genom att förutsätta att missilen ej roterar och att den träffar med sin längdriktning och rörelseriktning vinkelrät mot den träffade strukturens yta på sådant sätt att en rak central stöt erhålls.

I början av 1900-talet utvecklades i USA *modified Petry* formula (tar hänsyn till m , d , u , K) för bestämning av penetrationsdjupet i betong. Denna första version av ekvationen kallas *modified Petry I*. Ekvationen tar hänsyn till missilens vikt, diameter och islagshastighet, men ej dess spetsform eller betongens hållfasthet. Dock tas hänsyn till betongens armeringsinnehåll med hjälp av en koefficient kallad K_p . En senare version av formeln har ett K_p –värde som är kopplat till betongens hållfasthet. Denna version, kallad *modified Petry II*, har visat sig kunna ge stora avvikelser mot testresultat för normalt armerade (eller oarmerade) konstruktionsdelar. Erforderlig tjocklek för att undvika genomslag beräknas till 2 ggr penetrationsdjupet och för att undvika utstötning till 2.2 ggr penetrationsdjupet.

Army Corps of Engineers (m , d , u , f_{cc}) utvecklade på 1940-talet formler för bestämning av penetrationsdjupet samt erforderlig tjocklek för att förhindra genomslag eller utstötning. Dessa är framtagna genom statistisk passning mot försöksresultat. Liksom för *modified Petry* formula tas ej hänsyn till missilens spetsform.

Amman and Whitney (m , d , u , f_{cc} , N) har uppställt ett samband för bestämning av penetrationsdjupet som tar hänsyn till missilens spetsform. Denna gäller endast för mycket höga hastigheter och är därför ej speciellt tillämpbar för missiler i kärntekniska anläggningar. En snarlik ekvation, men utan hänsyn till spetsformen, har uppställts av *Ballistic Research Laboratory* (m , d , u , f_{cc}), dock gällande direkt för genomslags-tjockleken och alltså ej för penetrationsdjupet.

Under 1940-talet utvecklades i USA av *National Defence Committee* en teori för beräkning av penetrationsdjupet i betong. Denna teori stämde bra överens med till-

gängliga testresultat. Den gäller för en odeformerbar missil som träffar en oeftergivlig struktur. Med hjälp av denna teori kan inte bara penetrationsdjupet bestämmas utan även både penetrationsdjup-tidshistorien och missillast-tidshistorien. Erforderlig vägg-tjocklek för att undvika genomslag och utstötning kan också beräknas. Baserad på denna teori tog man fram modified National Defence Research Committee formula (m, d, u, f_{cc}, N). Denna formel har tre stora fördelar på grund av sin teoretiska härledning; för det första att den kan användas vid extrapolering utanför kända testdata, för det andra att den ger missillast-tidshistorien och för det tredje, vilket kommer att visas senare, kan hänsyn tas till deformerbara missiler och eftergivlig struktur.

Hughes (m, d, u, f_{cc}, N) har bestämt funktioner för beräkning av penetrationsdjup, utstötning och genomslag med hjälp av de testdata som ligger till grund för de tidigare beskrivna NDRC och ACE formula. Denna ekvation tar även hänsyn till hur tøjningshastigheten påverkar betongens egenskaper.

Chang (m, d, u, f_{cc}) har föreslagit två semianalytiska ekvationer för bestämning av genomslags- och utstötningstjockleken vid hårda missiler. Dessa bygger på statistisk hantering av försöksresultat.

1980 publicerade Degen (m, d, u, f_{cc}, N) ekvationer byggda på statistisk behandling av försöksresultat från ett flertal experiment.

Med hjälp av IRS (f_c) formula kan penetrationsdjup och erforderlig tjocklek för skydd mot genomslag och utstötning bestämmas genom att endast insätta betongens tryckhållfasthet.

Med stöd av testresultat från försök i kärntekniska anläggningar har Bechtel formula (m, d, u, f_{cc}) uppställts för bestämning av erforderlig tjocklek för att utstötning ej ska ske. Erforderlig tjocklek kan bestämmas dels för en hård missil och dels för en i viss mån deformerbar stålörmsmissil.

I Frankrike har CEA-EDF formula (m, d, u, f_{cc}, K) framtagits genom kalibrering mot försök. Här kan man, förutom att bestämma genomslagstjockleken, även beräkna hastigheten hos missilen när den har passerat igenom strukturen.

Winfrith har modifierat CEA-EDF formula till att även ta hänsyn till armeringsmängden i den träffade strukturen.

Kar (m, d, u, f_{cc}, K, N) har i sina ekvationer för beräkning av penetration, utstötning och genomslag tagit hänsyn till ballastkornens storlek i betongen.

Hårda missiler och örmissiler hanteras av Perry and Brown formula (m, d, u, f_{cc}, K).

UKEA (m, d, u, f_{cc}, K, N) har tagit fram riktlinjer för dimensionering av betongstrukturer belastade av stötkrafter. För lokal respons har samband uppställts för penetration, utstötning och genomslag, vilka främst bygger på försök utförda i Storbritannien och Frankrike.

I Sverige har Bergman (m, d, u, f_{cc}, N) i Fortifikationsförvaltningens regi uppställt ett samband för bestämning av penetrationsdjupet.

Samtliga ovan nämnda ekvationer är från början i princip framtagna för odeformerbara missiler som träffar oeftergivliga strukturer. Vissa av dem har anpassats eller kompletterats för att även kunna användas för deformerbara missiler och/eller eftergivliga strukturer. Speciella metoder för att ta hänsyn till deformerbara missiler finns utvecklade, bland annat *McMahon*, *Meyers*, *Sen* model och *Rotz damage* model.

En av de mest använda metoderna för att bestämma lokal respons hos betongkonstruktioner är modified National Defence Research Committee formula (modified NDRC formula), eventuellt kompletterad med teorier för att ta hänsyn till deformerbare missiler och eftergivlig träffad struktur. Den presenteras utförligare nedan som ett exempel på hur ekvationer för beskrivning av lokal respons kan vara uppbyggda.

Penetrationsdjupet för en odeformerbar missil träffande vinkelrät mot en oeftergivlig betongstruktur bestäms enligt modified NDRC formula såsom,

$$G(z) = KNd^{0.2}Du^{1.8} \quad (3.24)$$

där

$$G(z) = \frac{z^2}{4} \text{ för } 0 \leq z < 2.0 \quad (3.25)$$

$$G(z) = z - 1.0 \text{ för } z \geq 2.0 \quad (3.26)$$

och

$$z = \frac{x}{d} \quad (3.27)$$

$$K = \frac{180}{\sqrt{f_{cc}}} \quad (3.28)$$

$$D = \frac{m}{d^3} \quad (3.29)$$

x = penetrationsdjup (inches)

d = missilens diameter (inches)

u = missilens hastighet vid islag (fps)

N = spetsfaktor

m = missilens vikt (pounds)

f_{cc} = betongens tryckhållfasthet (psi)

Betongens penetrabilitet definieras av faktorn K , som beskriver betongens motstånd mot att penetreras. Parametern D beskriver projektilens densitet och bestämmer approximativt effekten av missilens massa på penetrationsdjupet.

Vid experiment gav försöksresultaten följande ekvationer för bestämning av genomslagstjockleken e ,

$$\frac{e}{d} = 1.23 + 1.07z \text{ för } 3 \leq \frac{e}{d} < 18 \quad (3.30)$$

$$\frac{e}{d} = 1.32 + 1.24z \text{ för } 3 \leq \frac{e}{d} < 18 \quad (3.31)$$

Dessa samband gäller endast för $e/d > 3$. För missiler i kärntekniska anläggningar är ofta e/d mindre än 3. Följande samband har därför uppställts,

$$\frac{e}{d} = 3.19z - 0.718z^2 \text{ för } \frac{e}{d} < 3 \quad (3.32)$$

Som tidigare nämnts är modified NDRC formula baserad på en teoretisk härledning, som ger en god överensstämmelse med testdata från utförda försök. Denna teori

möjliggör bestämning av tidshistorier för penetrationsdjup och last mot strukturen. Rörelseekvationen för tiden efter islag är,

$$\frac{m}{g} \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{m}{g} v \cdot \frac{dv}{dx} = -R \quad (3.33)$$

Om z och D insätts i denna ekvation erhålls,

$$Dv \frac{dv}{dz} = -R \quad (3.34)$$

där R är reaktionskraften verkande på missilen. I teorin för modified NDRC formula antas att reaktionskraften R vid en viss tidpunkt t kan representeras av följande samband,

$$R = cg(z)f(v) \quad (3.35)$$

Konstanten c bestäms ur försöksresultat medan funktionerna f och g beräknas enligt följande,

$$g(z) = \frac{z}{2} \text{ för } 0 \leq z < 2.0$$

$$g(z) = 1.0 \text{ för } z \geq 2.0 \quad (3.36)$$

$$f(v) = \frac{1}{KN} \left(\frac{v}{d} \right)^{0.2} \quad (3.37)$$

vilket insatt i (3.35) ger

$$R = \frac{c}{KN} g(z) \left(\frac{v}{d} \right)^{0.2} \quad (3.38)$$

Om denna ekvation i sin tur sätts in i (3.34) och integrering genom variabelsubstitution utförs fås,

$$G(z_1) = KNd^{0.2} Du^{1.8} \quad (3.39)$$

Maximal penetration kan därmed visas bli,

$$G(z_1) = \int_0^{z_1} g(z) dz \quad (3.40)$$

$G(z_1)$ beskriver den maximala penetrationen uttryckt i parametern $z = x/d$. Ekvation (3.39) är identisk med modified NDRC formula, ekvation (3.24), det vill säga genom att insätta uttrycket för reaktionskraften mot missilen, ekvation (3.38) i rörelseekvationen (3.33) kan modified NDRC formula härledas.

Om ekvation (3.38) insättes i ekvation (3.34) och integration utförs kan penetrationsdjupet (uttryckt i z) och missilens hastighet bestämmas för varje tidpunkt efter islag,

$$G(z) = G(z_1) \left[1 - \left(\frac{v}{u} \right)^{1.8} \right] \quad (3.41)$$

$$v = u \left[1 - \frac{G(z)}{G(z_1)} \right]^{\frac{5}{9}} \quad (3.42)$$

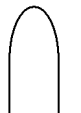
Hastighet definieras såsom,

$$v = \frac{dx}{dt} = d \frac{dz}{dt} \quad (3.43)$$

vilket tillsammans med (3.42) och integrering från islagsögonblicket fram till tidpunkten för fullbordad penetration (z_1) ger den totala tid som reaktionskraften verkar mot missilen (och strukturen),

$$T = \frac{d}{12u} \int_0^{z_1} \frac{dz}{\left[1 - \frac{G(z)}{G(z_1)} \right]^{\frac{5}{9}}} \quad (3.44)$$

Värden på spetsfaktorn N anges i figur 3.4 nedan.

Missiltyp:				
N	0.72	0.84	1.00	1.14

Figur 3.4 Värden på spetsfaktorn N enligt Hellström [10].

Framtagna samband för lokal respons är kalibrerade mot försök för i huvudsak slakarmerade betongkonstruktioner. Ingen kapacitetsökning har kunnat påvisas i spännarmerade konstruktioner på grund av spännkraften i sig (dvs det ökade trycket i konstruktionen). Däremot ökar spännstålets armeringsarea kapaciteten. En metod för att tillgodoräkna sig denna effekt redovisas i UKEA:s riktlinjer. Den bör dock utnyttjas med försiktighet på grund av det fåtal experiment som är utförda på spännarmerade konstruktioner.

Om *missilen är deformierbar* ger de redovisade metoderna för att bestämma erforderlig betongtjocklek ett alltför konservativt resultat. Man bör då på något sätt ta hänsyn till missilens deformerbarhet. Ett sätt är att använda speciella modeller som är utvecklade för detta ändamål, till exempel de ovan nämnda *McMahon*, *Meyers*, *Sen* model och *Rotz damage* model. I UKEA:s riktlinjer finns även uttryck för att ta hänsyn till deformerbara missiler.

Ett annat sätt är att anpassa någon av de ovan genomgångna metoderna för hårda missiler till att gälla även för deformerbara missiler. En sådan anpassning har gjorts för modified NDRC formula.

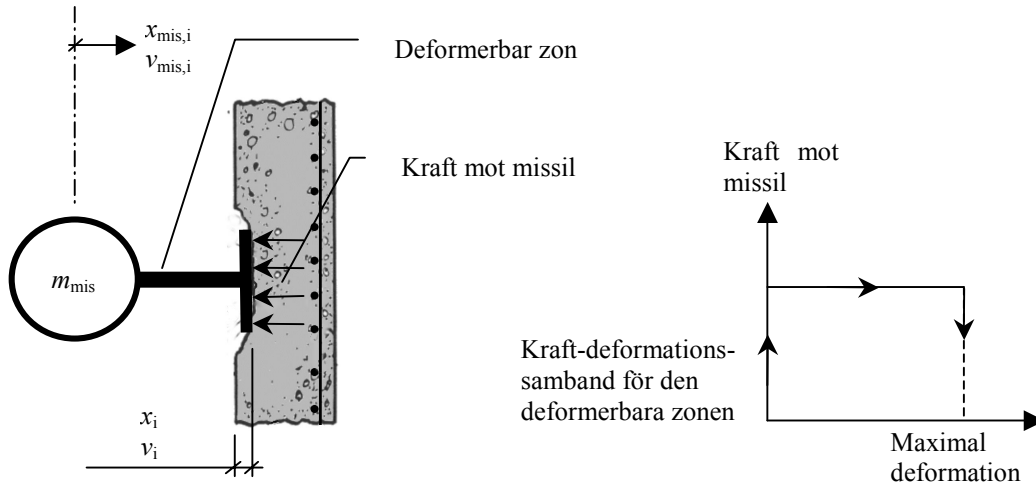
Den deformerbara missilen modelleras då som en massa kopplad till en deformerbar zon, se figur 3.5. Det antas att missilen är så lång i förhållande till sin deformation att all massa kan antas vara koncentrerad till delen bakom den deformerade zonen. När missilen träffar strukturen kommer den först att penetrera betongen och sedan, när kontaktkraften överskrider den deformerbara zonen hållfasthet, att deformeras. Det vill säga så länge som kontaktkraften underskrider den deformerbara zonen hållfasthet

penetrerar missilen betongen utan att deformeras. När hållfastheten har överskridits deformeras missilen och utövar då en konstant kraft mot strukturen, fram tills dess att den har bromsats in så mycket att kontaktkraften återigen underskrider den deformerbara zonens hållfasthet.

Vid varje tidpunkt under penetrationsförloppet är missilens hastighet $v_{mis,i}$ och dess förskjutning $x_{mis,i}$ medan deformationshastigheten och förskjutningen är $v_{def,i}$ respektive $x_{def,i}$. Penetrationsdjupet och penetrationshastigheten kan därmed tecknas,

$$x_i = x_{mis,i} - x_{def,i} \text{ respektive } v_i = v_{mis,i} - v_{def,i} \quad (3.45)$$

Tidigare visades att kraften mot strukturen kunde bestämmas såsom en funktion av penetrationsdjupet och missilens hastighet vid betraktad tidpunkt, se ekvation (3.35). Den maximala hållfastheten hos missilen (innan den deformerbara zonens bärförmåga överskrids) maximerar den möjliga penetrationshastigheten. Med hjälp av denna övre begränsning av missilens penetrationshastighet kan missilens deformationshastighet bestämmas genom användandet av ekvation (3.45). Rörelseekvationen för en deformerbar missil kan därmed uppställas och lösas numeriskt med hjälp av kraftsambandet definierat i ekvation (3.35).



Figur 3.5 Idealiserad deformerbar missil träffande en oftergivlig struktur.

Normalt behöver missilens deformation vara minst av storleksordningen 40% av penetrationen för en hård missil för att erforderlig utstötningstjocklek ska påverkas i någon större omfattning.

För en hård missil som träffar en *eftergivlig struktur* kan genomgångna metoder också ge ett för konservativt resultat. Det går att även ta hänsyn till denna inverkan vid användandet av modified NDRC formula, vilket görs på följande sätt.

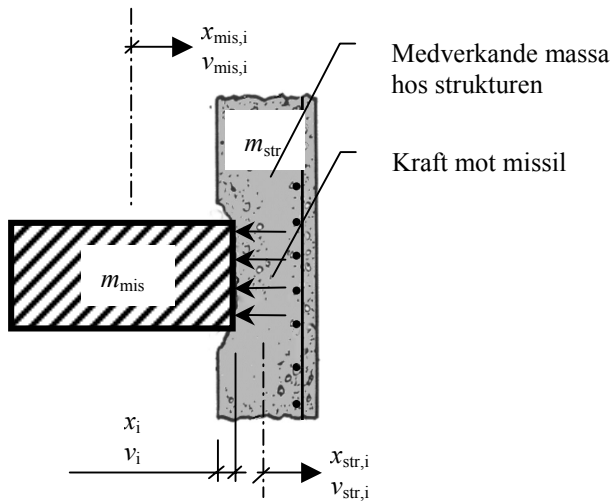
Figur 3.6 visar en hård missil med vikten m_{mis} som träffar en initiiellt stillastående struktur med en effektiv (medverkande) vikt m_{str} . Vid islag är missilens initialhastighet v_{mis} och dess förskjutning noll. Den träffade strukturens hastighet och förskjutning är båda noll. Efter islaget är, vid betraktad tidpunkt, missilens hastighet och förskjutning $v_{mis,i}$ respektive $x_{mis,i}$ medan strukturens hastighet och förskjutning är $v_{str,i}$ respektive $x_{str,i}$. Missilens penetrationsdjup och penetrationshastighet in i strukturen är då,

$$x_i = x_{mis,i} - x_{str,i} \text{ respektive } v_i = v_{mis,i} - v_{str,i} \quad (3.46)$$

Genom insättning av ekvation (3.46) i kraftsambandet ekvation (3.35) och lösning av missilens och strukturens rörelseekvation kan det visas att penetrationen kan bestämmas med hjälp av modified NDRC formula genom att bestämma D såsom,

$$D = \frac{m_{mis}}{d^3(1 + c_m)} \text{ där, enligt tidigare, } c_m = \frac{m_{mis}}{m_{str}} \quad (3.47)$$

Detta innebär att en modifierad missilvikt används istället för den verkliga missilens vikt, jämför ekvation (3.29).



Figur 3.6 Odeformerbar missil träffande en eftergivlig struktur.

Bestämning av tillåten missilbelastning avseende genomstansningsbrott, se figur 3.3d, kan bestämmas enligt samma metoder som för statisk belastning med användandet av den maximala belastningen mot strukturen, erhållen ur en dynamisk analys. Vid försök har det visat sig att genomslag i många fall uppstår före en utstötning av en genomgående brottkon (genomstansningsbrott).

Om genomslag erhålls kan missilens utgångshastighet bestämmas. Detta kan vara av vikt för att bedöma om missilen kan skada säkerhetsrelaterad utrustning som är placerad bakom den träffade strukturen. Bestämning av missilens utgångshastighet efter genomslag av en betongkonstruktion kan bestämmas med hjälp av uttryck uppbyggda enligt följande princip,

$$v_r = \sqrt{b \cdot (v_0^2 - v_B^2)} \text{ där } b = \frac{m}{m + m_p} \quad (3.48)$$

v_r = missilens utgångshastighet vid genomslag (ft/s)

v_0 = missilens hastighet vid islag (ft/s)

v_B = missilens hastighet vid islag, som precis ger upphov till genomslag (ft/s)

m = missilens massa (lb)

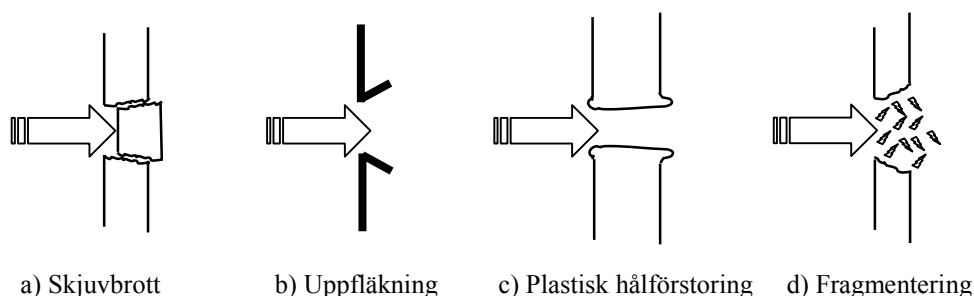
m_p = medverkande betongmassa beräknad på volymen (väggens tjocklek) gånger (ca 1.4*missilens diameter) (lb)

3.2.3.2 Stålkonstruktioner

3.2.3.2.1 Förutsättningar och skadefenomen

På samma sätt som för missiler träffande betongkonstruktioner har forskning och utveckling för missiler mot stålstrukturer sitt ursprung inom militärindustrin. Därefter har kärnkraftsindustrin kompletterat med egna forskningsinsatser.

I figur 3.7 ges exempel på lokala brottfenomen i stålkonstruktioner. De viktigaste lokala skadefenomenen för vanligen förekommande stålkonstruktioner i kärntekniska anläggningar är penetration och genomslag. För stål av god kvalitet uppstår vanligen ingen utstötning på baksidan av den träffade strukturen.



Figur 3.7 Exempel på lokala brottfenomen för stålkonstruktioner (från Goldsmith [13]).

3.2.3.2.2 Samband för bestämning av lokal strukturrespons

Nedan redovisas olika samband för bestämning av lokal strukturrespons hos stålkonstruktioner. För ytterligare information se till exempel Bangash [9] och ASCE [14].

Ett flertal olika samband för bestämning av penetration och genomslagstjocklek har framtagits. På 1970-talet var i USA de vanligast använda ekvationerna *Ballistic Research Laboratory* formula (BRL), *Stanford Research Institute* Equation (SRI) och *Hagg-Sankey* formulation. Samtidigt fanns uttryck framtagna av bland annat *Healey and Weissman*, *Hockanson and Baker*, *Adams and Brown* och *Tsai and Orr*. Dessa har senare kompletterats med ytterligare ekvationer, till exempel *Kar steel target* formula och *de Marre modified* formula.

Uppställda samband tar oftast hänsyn till missilens vikt (m), diameter (d), hastighet (u) och eventuellt dess spetsform (N) samt stålkonstruktionens hårdhet eller hållfasthet (f_s). Konservativa antaganden har gjorts genom att förutsätta att missilen ej roterar och att den träffar med sin längdriktning och rörelseriktning vinkelrät mot strukturens yta på sådant sätt att en rak central stöt erhålls.

BRL formula (m , d , u) är framtagen för hårda missiler med liten diameter och hög densitet träffande tunna stålkonstruktioner. Den är oberoende av den träffade strukturens utbredning och upplagsförhållanden.

SRI equation (m , d , u , f_s) är likaså framtagen för små, hårda missiler träffande tunna strukturer. Den tar, till skillnad från BRL formula, även hänsyn till den träffade strukturens draghållfasthet.

Hagg-Sankey formulation (m, d, u, f_s) består av semiempiriska samband för missil/struktur-samverkan vid lokal respons. Kontrollen av genomslag delas upp i två steg. I det första steget kontrolleras genomslag gentemot strukturens tryck- och skjuvhållfasthet i islagsområdet. I det andra steget utvärderas risken för genomslag gentemot den träffade strukturens möjliga energiupptagning på grund av töjning.

I Sverige har Bergman under 1950-talet uppställt samband för missiler träffande stålkonstruktioner.

Ballistic Research Laboratory (BRL) formula och Stanford Research Institute (SRI) Equation är som sagt vanligt förekommande och redovisas därför här som exempel på hur denna typ av ekvationer kan vara uppbyggda,

$$\left(\frac{e}{d}\right)^{3/2} = \frac{Du^2}{1120000 \cdot \bar{K}_p^2} \quad \text{BRL formula} \quad (3.49)$$

e = genomslagstjocklek (inches)
 $d = (4 A_m)/\pi$ missilens effektiva diameter (inches)
 A_m = missilens area (inch²)
 $D = m/d^3$ (lb/ in³)
 m = missilens vikt (lb)
 u = missilens hastighet vid islag (ft/s)
 K_p = stålets penetrationsfaktor, väljs oftast till 1.0

$$\left(\frac{e}{d}\right)^2 + \left(\frac{3}{128}\right)\left(\frac{b}{d}\right)\left(\frac{e}{d}\right) = \frac{0.0452Du}{f_{st}} \quad \text{SRI equation} \quad (3.50)$$

e, d, D och u lika ovan
 b = bredden hos den träffade strukturen (inches)
 f_{st} = stålets draghållfasthet (lb/in²)

Vid nykonstruktion rekommenderas att öka erforderlig tjocklek med ca 20%.

På grund av att stål är ett mer homogent material än betong har ett flertal analytiska uttryck för bestämning av penetration och genomslag kunnat uppställas. Om missilerna har tillräckligt låg hastighet, så att faktorer av typen specifik värme och energi för smältning ej har betydelse, kan dessa principiellt beskrivas som en funktion av en mängd dimensionslösa parametrar,

$$\frac{z}{d} = f\left(u \sqrt{\frac{\rho_{mis}}{f_{str}}}, \frac{l}{d}, \frac{h}{d}, \frac{E_{mis}}{E_{str}}, \frac{f_{mis}}{f_{str}}, \frac{\rho_{mis}}{\rho_{str}}\right) \quad (3.50)$$

z = penetrationsdjup
 u = missilens hastighet
 ρ_{mis} = missilens densitet
 ρ_{str} = strukturens densitet
 l = missilens längd
 d = missilens diameter
 h = missilens spetslängd
 E_{mis} = missilens densitet
 E_{str} = strukturens densitet
 f_{mis} = hållfasthetsparameter för missilen
 f_{str} = hållfasthetsparameter för strukturen

I till exempel Bangash [9] anges analytiska uttryck för penetration av trubbnosig respektive spetsig missil i stål.

Flera uttryck för bestämning av missilens utgångshastighet vid genomslag finns uppställda. De är ofta uppbyggda enligt följande princip,

$$v_r = \sqrt{v_0^2 + v_B^2} \quad (3.51)$$

vid spetsig missil och

$$v_r = \sqrt{\frac{m}{m + m_p} \cdot (v_0^2 - v_B^2)} \quad (3.52)$$

v_r = missilens utgångshastighet vid genomslag (ft/s)

v_0 = missilens hastighet vid islag (ft/s)

v_B = missilens hastighet vid islag, som precis ger upphov till genomslag (ft/s)

m = missilens massa (lb)

m_p = stålpluggens massa (lb)

vid trubbig missil som trycker en stålplugg framför sig vid perforeringen.

3.2.3.3 Samverkanskonstruktioner av stål och betong

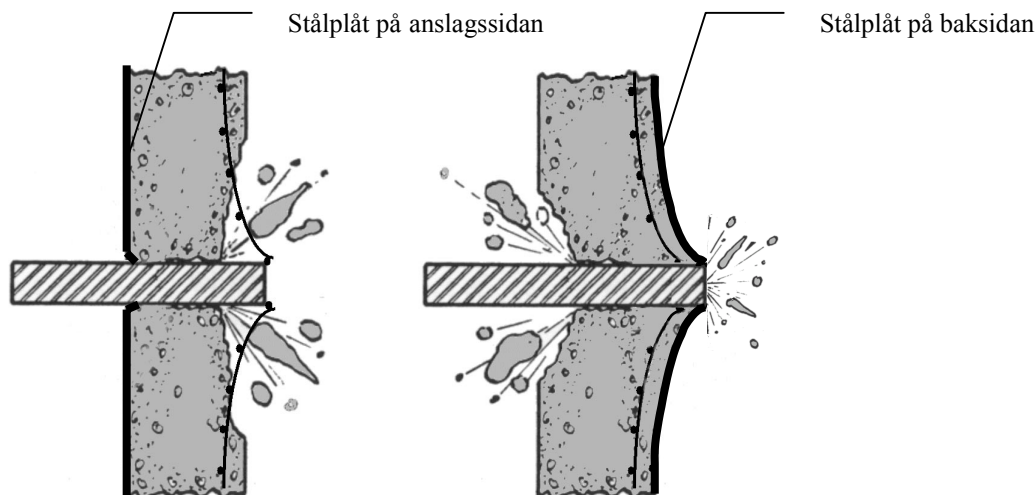
Betongväggar förstärkta med stålplåt på ena eller båda sidorna har studerats av till exempel Barr [15] vid tester utförda under mitten av 1980-talet. Stålplåtarna var förankrade i betongen med tätt sittande påsvetsade dymlingar. Strukturen som användes vid försöken var en skalenlig modell av den typ av plåtklädda betongkonstruktioner som ofta förekommer i kärntekniska anläggningar. Informationen nedan är hämtad från utvärderingen av dessa tester.

Försöken visar att för betongväggar med stålplåt på den träffade sidan erfordras det en energi för att uppnå genomslag som motsvarar summan för stålplåten och betongväggen var för sig.

För en betongvägg med stålplåten placerad på baksidan erfordras en betydligt större energimängd än för att perforera en vägg med plåten placerad på anslagssidan. Detta beror på skillnaden i brottyper för de båda konstruktionerna, se figur 3.8. Vid stålplåten placerad på den träffade sidan fås ett genomstansningsbrott i plåten, medan man för en plåt på baksidan får membranverkan och ett dragbrott. Beteendet för den dragna plåten liknar det beteende som armeringen (på bortsidan av väggen) uppvisar vid missilgenomslag.

Vid bestämning av erforderlig energi för att erhålla genomslag i en betongvägg med stålplåt på baksidan kan, beroende på ovan nämnda likhet i brottbeteende, en analogi uppställas mellan stålplåtens area och armeringsmängden i en betongvägg.

För en betongvägg inklädd med stålplåtar på båda sidor erfordras för att erhålla genomslag en energimängd motsvarande summan av perforering av framsidans plåt fristående och perforering av en betongvägg med plåt enbart på baksidan.



Figur 3.8 Genomslag i armerad betongvägg förstärkt med stålplåt på träffad sida respektive på baksidan.

Ovanstående metoder är inarbetade i UKEA:s riktlinjer för dimensionering av betongkonstruktioner utsatta för stötkrafter. I dessa riktlinjer anges även ett samband för utnyttjande av ovan nämnda analogi mellan armeringen och stålplåtens mothållande effekt.

3.2.4 Global strukturrepons

3.2.4.1 Förutsättningar och skadefenomen

Traditionellt har vanligtvis globala lasteffekter till följd av missiler hanterats genom att betrakta missilen och den påverkade konstruktionen som två separata system, dvs interaktion mellan dem försummas. Härvid appliceras reaktionskrafterna och/eller den kinetiska energi som framräknats från analysen av missilen mot anslutande eller påverkade konstruktionsdelar, varefter lasteffekterna beräknas.

Global dynamisk lasteffekt på strukturen utgörs i huvudsak av böjdeformation och ett eventuellt böjmoment- eller tvärkraftsbrott. Instabilitetsfenomen kan uppträda för strukturer tryckbelastade i sin längdriktning, exempelvis pelare och väggar.

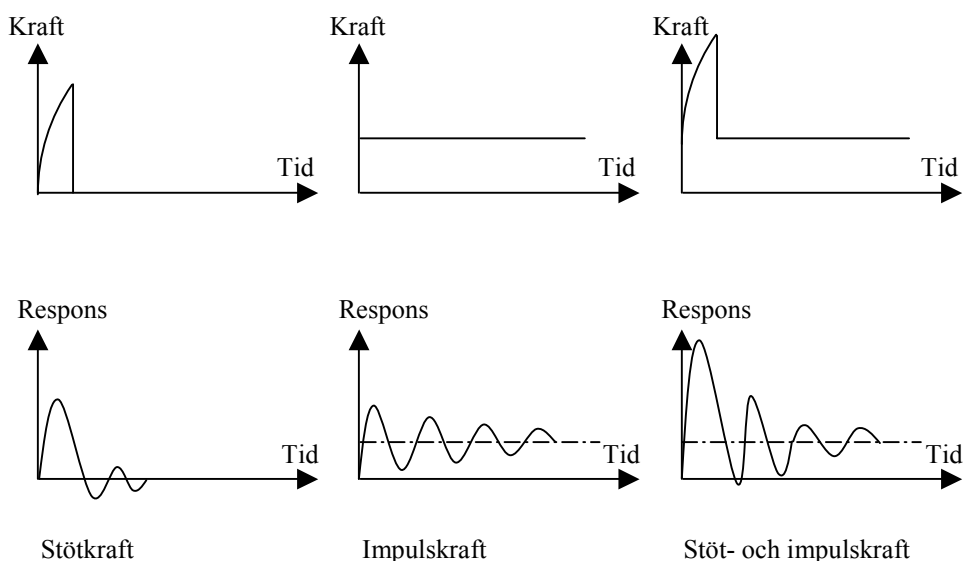
Vibrationer i strukturen kan påverka system och komponenter monterade i anläggningen. För en sådan missil kan sekundärresponsspektra tas fram för aktuella sekundärkomponenter med missillasten applicerad på strukturen i möjliga (och farliga) lägen.

Händelser som genererar missiler kan ge upphov till två typer av laster, *stötlaster* respektive *impulslaster*.

Stötlaster karakteriseras av att strukturen transient påförs en kortvarig ändlig energimängd, uppåt begränsad av den kinetiska energin hos missilen just före islag, jämför ekvation (3.22). Denna typ av last genereras när missilen slår i strukturen.

Impulslaster karakteriseras av en på strukturen transient påförd last med en relativt längre varaktighet. Exempel på denna typ av last är tryckökning i utrymmen på grund av rörbrott eller jetstrålkraft på grund av det från rörmyningen utströmmande mediet. Stötlaster kan även "översättas" till kortvarigare impulslaster vid en global strukturanalys.

Båda dessa lasttyper kan behöva kombineras för att bestämma den totala lasteffekten på strukturen. I figur 3.9 visas de båda lasttyperna var för sig och kombinerade samt tillhörande principiella strukturensvaret.



Figur 3.9 Typ av dynamisk last med tillhörande strukturensvaret.

3.2.4.2 Analyismetoder

3.2.4.2.1 Allmänt

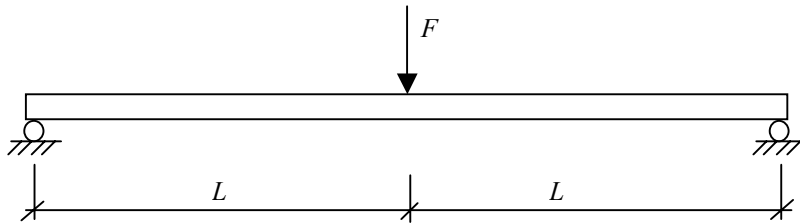
Tre traditionella dimensioneringsmetoder för att förutsäga den globala responsen av en stötlast presenteras i de följande avsnitten. Dessa är *statisk analys med dynamisk förstöringsfaktor*, *energibalansmetoden* samt *impuls-rörelsemängd metoden*.

Om tidshistorien för lasten kan bestämmas, antingen genom impuls-rörelsemängd metoden ovan eller på annat sätt, kan den globala strukturensvaret bestämmas genom en vanlig dynamisk analys. Denna analys kan vara mer eller mindre komplicerad beroende på krav på noggrannhet samt tillgänglig tid och beräkningskapacitet. Här redovisas några enklare dynamiska analyismetoder som traditionellt har använts.

3.2.4.2.2 Statisk analys med dynamisk förstöringsfaktor

Vid studie av dynamiska system där responsen hos den globala strukturen till stora delar är plastisk gäller det i första hand att visa att strukturen kan ta hand om den energimängd som tillförs strukturen, och inte att visa att strukturen klarar av att motstå en viss maximal kraft. Detta är fallet för de flesta av de missiler som studeras i denna rapport. Därmed är metoden att analysera dynamiska system som ett statiskt system med en dynamisk förstöringsfaktor ej tillämpbar. Följande exempel belyser detta på ett bra sätt.

Betrakta en homogen fritt upplagd balk av ett stelplastiskt material, belastad med en punktlast i fältmitt, se figur 3.10. Stelplastiskt material beskrivs i figur 3.11b.



Figur 3.10 Fritt upplagd balk med en punktlast i fältmitt.

Denna balks maximala kapacitet är,

$$F_{\max} = \frac{2M_{pl}}{L} \quad (3.53)$$

M_{pl} = balkens plastiska momentkapacitet

$2L$ = spännvidd enligt figur 3.10

För en statisk belastning som är lägre än denna kapacitet kommer ingen deformation alls att ske av strukturen. Om lasten ökas så att den överskrider $F_{\max}$, (dvs ett plastiskt beteende utbildas) och därefter hålls konstant under lång tid, kommer en mycket stor (oändlig) deformation att ske på grund av att inget jämviktsläge finns. Detta gäller om materialets töjningshårdnande samt geometrisk olinjäritet försummas.

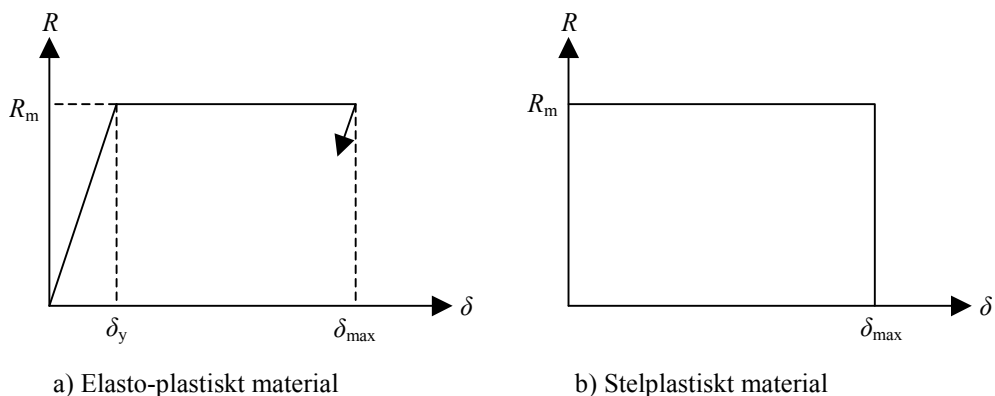
Om lasten istället endast påförs under en kortare tid kommer strukturen att deformeras tills dess att lasten upphör. Balken har då intagit ett permanent utböjt läge och någon ytterligare deformation sker ej. Konstruktionen har nu tillförts en ändlig energimängd som har absorberats av balkens plastiska deformation. Gränsen för balkens bärförmåga bestäms därmed av maximalt tillåten plastisk deformation, dvs dess duktilitet.

3.2.4.2.3 Energibalansmetoden

Vid användandet av energibalansmetoden antages att brott uppstår då den belastade (träffade) strukturens maximala töjningsenergi är mindre än den totala kinetiska energin vid missilslag.

Först beräknas ett värde på den kinetiska energin som måste absorberas av strukturen. Detta värde beror på valet av effektiv medverkande massa hos den träffade strukturen, jämför ekvation (3.22). Baserat på valet av denna effektiva massa samt på missilens vikt och hastighet kan den kinetiska energin beräknas, under förutsättning av plastisk stöt.

En bilinjär elastoplastisk arbetskurva antas för strukturen. Den definieras av de tre värdena brottlast (R_m), brottdeformation ($\delta_{\max}$) samt deformation vid flytgränsen (δ_y), se figur 3.11a. Ofta kan energiupptagningen för den elastiska delen av responsen försummas och ett stelplastiskt material ansätts, se figur 3.11b. För en betongvägg kan brottlasten då bestämmas med hjälp av brottlinjeteori och för en stålkonstruktion med hjälp av gränslastteori.



Figur 3.11 Elasto-plastiskt respektive stelplastiskt material.

Brottdeformationen bestäms indirekt av tillåten duktilitet hos den belastade strukturen. Ett mått på duktiliteten hos ett material är dess duktilitetskvot, som är kvoten mellan brottdeformation och deformation när materialet börjar flyta. Typiska värden på duktilitetskvoten för olika strukturer redovisas i tabell 3.2 nedan.

För att detta betraktelsesätt ska gälla för betongkonstruktioner måste dessa uppvisa ett duktilt brott, vilket innebär att tvärkraftskapaciteten ej får vara dimensionerande samt att böjbrottet ej får begränsas av betongkrossning i tvärsnittets tryckta del. Betongkonstruktioner i kärntekniska anläggningar har oftast ett duktilt beteende.

Baserat på beräknade värden av den kinetiska energin och last-deformationssamband för strukturen kan en erforderlig duktilitetskvot bestämmas,

$$\mu_{erf} = \frac{\delta_{erf}}{\delta_y} \quad (3.54)$$

δ_{erf} = erforderlig deformation för att upptaga tillförd kinetisk energi

δ_y = deformation för vilken materialets flytgräns uppnås

Om kvoten är mindre än 1.0 är responsen elastisk, är den större än 1.0, men mindre än maximalt tillåtet värde, är responsen plastisk men acceptabel. Om den erforderliga duktilitetskvoten överskrider det maximalt tillåtna värdet antas strukturen ej kunna motstå aktuell belastning.

Material	Maximalt tillåten duktilitetskvot, μ	Kommentar
<u>Slakarmerad betong</u>		
Dubbelarmerad platta utsatt för böjning	$0.05/(\rho - \rho') < 15.0$	ρ och ρ' är armeringsinnehållet för dragen respektive tryckt sida.
Platta utsatt för skjuvning	1.0	Skjuvning upptas endast av betong.
	1.3	Skjuvning upptas av både betong och skjuvarmeringsbyglar.
	3.0	All skjuvning upptas av skjuvarmeringsbyglar.
Tryckt vägg	1.3	
<u>Stål</u>		
Böjd konstruktion	10.0	Öppen sektion, till exempel I-balk.
	20.0	Sluten sektion, till exempel fyrkantsprofil.
	5.0	Gäller när skjuvning är dimensionerande.
Dragen konstruktion	$0.5 (\varepsilon_u / \varepsilon_y)$	ε_u är brottöjning och ε_y flytöjning.
Tryckt konstruktion	≤ 1.3	för $l/r \leq 20$, där l är knäcklängd och r är tröghetsradie
	≤ 1.0	för $l/r > 20$

Tabell 3.2 Exempel på typiska värden för maximalt tillåten duktilitetsfaktor (från ASCE [16], SRP[3] med flera).

Duktilitetskvoten kan uttryckas både som en kvot mellan förskjutningar eller som en kvot mellan rotationer. För en specifik konstruktion kan ett matematiskt samband uppställas mellan dessa båda duktilitetskvoter. De i tabell 3.2 angivna duktilitetskvoterna avser förskjutningar.

Som exempel kan en kvadratisk betongplatta centriskt belastad med en punktlast studeras, se figur 3.12. Plasticitetsteoretisk bärförmåga för aktuell brottlinje kan visas vara,

$$F_{\max, pl} = 2\pi(m_u + m'_u) \quad (3.55)$$

m'_u = momentkapacitet vid dragning i plattans underkant

m_u = momentkapacitet vid dragning i plattans överkant

Mittutböjningen (under lasten F) är,

$$\delta = \frac{L}{2} \tan \theta \approx \frac{L}{2} \theta \quad (3.56)$$

L och θ enligt figur 3.12.

Mittutböjningen begränsas av rotationskapaciteten θ_u i plattans flytleder. Maximalt tillåten mittutböjning är då,

$$\delta_u \approx \frac{L}{2} \theta_u \quad (3.57)$$

Den maximala töjningsenergi som plattan kan upptaga är,

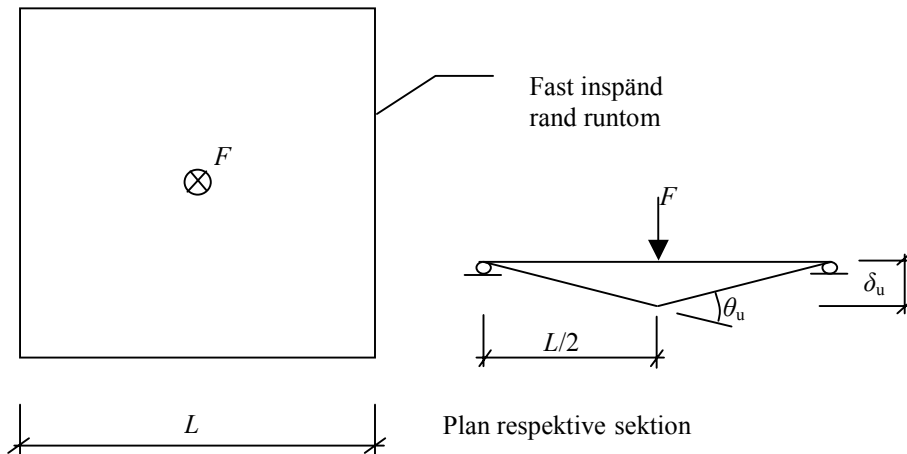
$$V_{str} = F_{\max, pl} \delta_u = 2\pi(m_u + m'_u) \frac{L}{2} \theta_u = 2\pi m_u L \theta_u \text{ om } m_u = m'_u \quad (3.58)$$

Det finns ett flertal sätt att bestämma maximalt tillåten rotationskapacitet för en betongplatta. Ett approximativt värde, baserat på provningsresultat, som ofta används i missilsammanhang är,

$$\theta_u \approx 0.0065 \frac{d}{x} \quad (3.59)$$

d = betongplattans effektiva höjd

x = tryckzonshöjden



Figur 3.12 Kvadratisk platta belastad med centrisk punktlast.

Man kan även genom en geometribetraktelse av tvärsnittet beräkna maximal rotationskapacitet om betongens tillåtna stukning och flytleddens utbredning kan uppskattas. Om betongstukningen begränsas enligt anvisningar i BBK 94 [6], 3.5 ‰, samtidigt som flytleddens längd uppskattas till dubbla inre hävarmen erhålls i princip ekvation (3.59).

Uttryck för att bestämma rotationskapaciteten vid statisk last finns till exempel i Betonghandboken Konstruktion.

Plattans styvhet för en centrisk punktlast kan visas vara,

$$k_e = \frac{12EI}{0.0671L^2(1-\nu^2)} \quad (3.60)$$

EI = betongens böjstyvhet

ν = tvärkontraktionstal

Deformationen när strukturen övergår till plastisk beteende kan då bestämmas såsom,

$$\delta_y = \frac{F_{\max, pl}}{k_e} \approx 0.070 \frac{mL^2}{EI} \quad (3.61)$$

Maximalt tillåten duktilitetskvot kan nu beräknas ty både maximalt tillåten utböjning, δ_u (ekvation (3.57)), och utböjning för att erhålla flytning, δ_y (ekvation (3.61)), är kända,

$$\mu_{till} = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (3.62)$$

Denna kvot ska vara större än erforderlig duktilitetskvot, bestämd enligt ekvation (3.54), för att plattan ska klara av påförd missilbelastning.

Om plattans ränder är låsta i plattans plan kan ytterligare kapacitet tillgodoräknas på grund av membranverkan i plattan.

3.2.4.2.4 Impuls-rörelsemängd metoden

Denna metod utnyttjar lagen om rörelsemängdens bevarande. Härmed fås att produkten av missilens massa och hastighet måste vara lika stor som den impuls som uppstår mot missilen när den träffar strukturen. Impulsen representerar arean under kraft-tidskurvan verkande mot missilen. Jämför ekvation (3.1) – (3.5).

En kraft-tidsfunktion vars area är lika med massan gånger hastigheten bestäms. Detta är den stora skillnaden gentemot energibalansmetoden.

Denna funktion kan till exempel ansättas som en rektangulär impuls, begränsad av en maximal kraft mot missilen, varur man kan bestämma impulsens varaktighet så att impulsen blir lika stor som rörelsemängden. För vissa typer av missiler kan andra mer noggranna impulsformer användas.

Den maximala kraften mot missilen kan approximativt, under antagandet av att den träffar en oeftergivlig struktur, beräknas till exempel med missilen modellerad som ett elastiskt enfrihetsgradssystem eller som en kontinuerlig elastisk stång, se figur 3.13. Båda dessa metoder ger upphov till samma maximala kraft,

$$F = v\sqrt{km} \quad (3.63)$$

där v är missilens hastighet, k dess ekvivalenta styvhet och m dess massa. För enfrihetsgradsystemet kan kraften F bestämmas genom att studera den kinetiska energin T och den potentiella energin V vid maximal kompression,

$$T = \frac{mv^2}{2} \text{ och } V = \frac{F^2}{2k} \quad (3.64)$$

För den kontinuerliga elastiska stängen är kraften mellan stång och struktur,

$$F = Zv \quad (3.65)$$

$$Z = \frac{EA}{c} \text{ är stångens impedans}$$

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \text{ är våghastigheten}$$

E = elasticitetsmodul

A = tvärsnittsarea

ρ = densitet

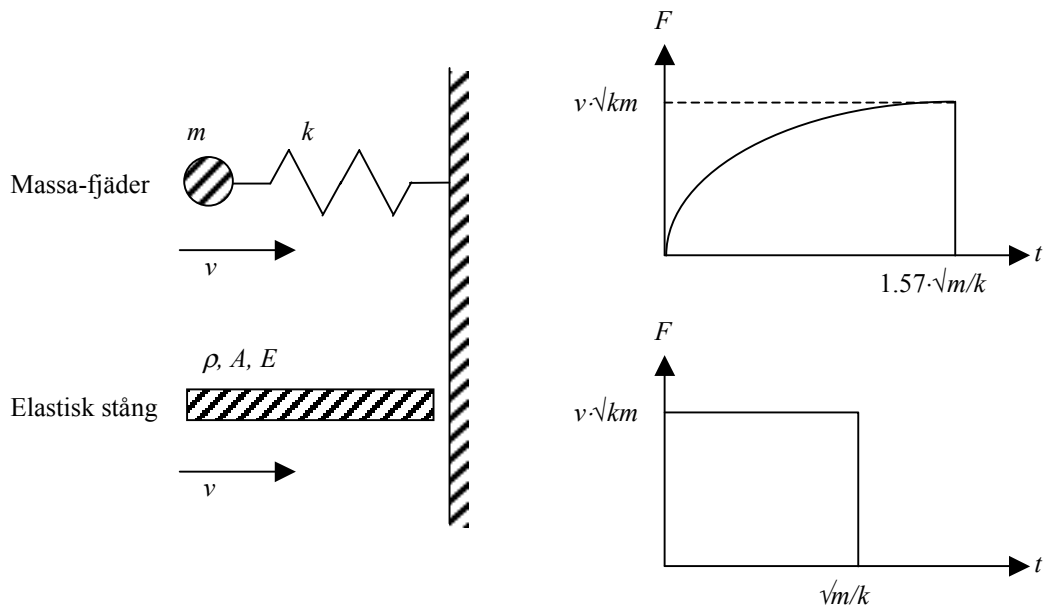
Om Z och c insättes i ekvation (3.65) fås,

$$F = vA\sqrt{E\rho} \quad (3.66)$$

Med $k = \frac{EA}{L}$ och $m = \rho AL$ fås ekvation (3.63) igen.

L = stångens längd

I de flesta verkliga fall kommer, som tidigare har diskuterats, missilen ej att uppträda helt elastiskt utan beteendet kommer att vara en kombination av elastisk och plastisk deformation och eventuell buckling. Ovan beräknade kraft F kan dock fungera som en bra approximation och ger en övre gräns för maximalt värde på kraften.



Figur 3.13 Modellering av missil som elastiskt enfrihetsgradssystem respektive elastisk stång.

Om styvheten vid avlastning antas vara oändlig, vilket motsvarar ett plastiskt beteende, kommer tidsfunktionen för de båda missiltyperna att se ut som i figur 3.13 och skilja sig åt. De definieras nedan.

Vid modellering av missilen som ett elastiskt enfrihetsgradssystem blir kraftens varaktighet,

$$\Delta t = 0.5\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \approx 1.57\sqrt{\frac{m}{k}} \quad (3.67)$$

och för antagandet av en kontinuerlig elastisk stång,

$$\Delta t = \frac{L}{c} = L\sqrt{\frac{\rho}{E}} = \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (3.68)$$

Det kan enkelt visas att för båda fallen är impulsen lika stor som röreslemängden, dvs

$$\int F dt = mv \quad (3.69)$$

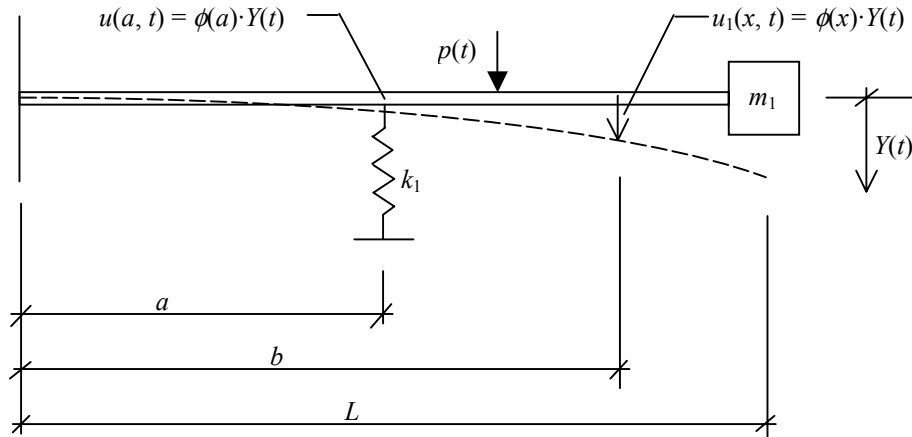
vilket ju är det grundläggande sambandet för denna metod.

Alternativt kan kraft-tidshistorien beräknas på annat sätt, till exempel med hjälp av modified NDRC formula, se avsnitt 3.2.3.1.2.

Den ovan framräknade kraft-tidshistorien (impulslasten) antas sedan belasta den globala strukturen, vars dynamiska strukturrespons därmed kan beräknas, se vidare följande avsnitt.

3.2.4.2.5 Strukturrespons för en impulslast

Bestämning av den dynamiska responsen för en impulslast kan ske med mer eller mindre avancerade dynamiska analysmetoder. En metod är att approximera strukturen med ett enfrihetsgradssystem med hjälp av generaliserade koordinater, se figur 3.14.



a) Studerat fysiskt system

$$k^* = EI \cdot \int_0^L [\phi''(x)]^2 dx + k_1 \phi^2(a)$$

$$c^* = 2\lambda \cdot \sqrt{m^* k^*}$$

$$m^* = \mu \cdot \int_0^L \phi^2(x) dx + m_1 \phi^2(L)$$

$$P^*(t) = P(t) \phi(b)$$

b) Transformerat enfrihetsgradssystem med generaliserade parametrar

Figur 3.14 Generaliserat enfrihetsgradssystem med både diskreta och kontinuerliga parametrar (från ASCE [14]).

Med denna metod representeras deformationen i varje punkt av strukturen som produkten mellan en vald utböjningsfunktion och en tidsberoende generaliserad koordinat,

$$v(x, t) = \phi(x) \cdot Y(t) \quad (3.70)$$

där $\phi(x)$ är den valda utböjningsfunktionen som representerar strukturens utböjningsform och $Y(t)$ är den generaliserade koordinaten. Med hjälp av virtuella arbetes princip kan rörelseekvationen uttryckas i termer av den generaliserade koordinaten såsom,

$$m^* \cdot Y'' + k^* \cdot Y' = P^*(t) \quad (3.71)$$

där m^* är den generaliserade massan, k^* den generaliserade styvheten och $P^*(t)$ den generaliserade dynamiska lasten, se figur 3.14.

Vid bestämning av de generaliserade parametrarna finns två olika fall, en där parametrarna är koncentrerade till diskreta punkter (lumpade massor, diskreta fjädrar, koncentrerade laster) och en där parametrarna är kontinuerliga (distribuerad massa, böjstyvhet, utbredd last). För ett diskret system beräknas de generaliserade parametrarna enligt följande,

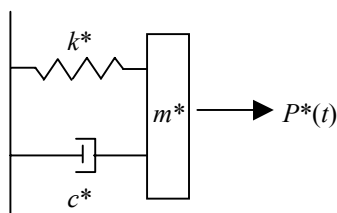
$$m^* = \sum [m_i \phi_i^2], \quad k^* = \sum [k_i (\Delta \phi_i)^2], \quad P^* = \sum [p_i \phi_i] \quad (3.72)$$

I fallet med kontinuerliga parametrar antas den elastiska mothållande kraften bestå av enbart böjande moment proportionell mot strukturens krökning. För vissa strukturer används en kombination av diskreta och kontinuerliga parametrar, se figur 3.14.

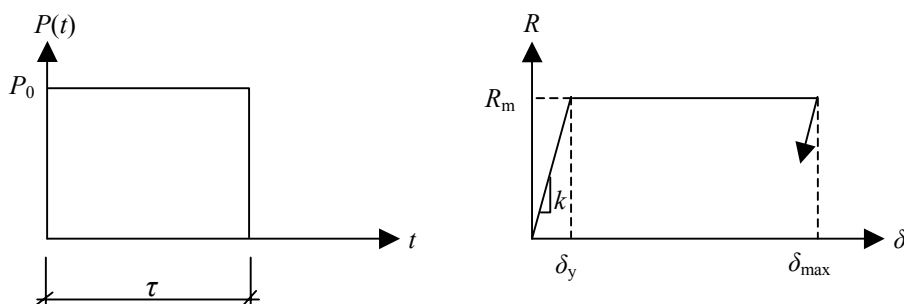
Härmed kan en diskret struktur med flera frihetsgrader eller en kontinuerlig struktur med oändligt många frihetsgrader transformeras till ett ekvivalent enfrihetsgradssystem. Den generaliserade deformationen Y bestäms genom lösning av rörelseekvationen för det transformerade systemet.

Om strukturens respons sker i det elastiska området kan rörelseekvationen för det generaliserade systemet lösas analytiskt i slutet form med hjälp av klassiska metoder. Om strukturen däremot belastas över materialets flytgräns, vilket ofta är fallet för missillaster, blir responsen olinjär och den mothållande kraften en funktion av flytvillkoren. Under dessa förutsättningar kan i vissa fall fortfarande en analytisk lösning på slutet form erhållas, vilken dock kan vara besvärlig att härleda. Därför kan det här vara på sin plats att använda numeriska metoder för att lösa rörelseekvationen, se avsnitt 3.2.4.2.6.

Ett specialfall av olinjär respons som är vanligt förekommande vid bestämning av strukturens respons för missillaster är en bilinjär arbetskurva med ett elastoplastiskt beteende. Ett generaliserat enfrihetsgradsystem med ett sådant materialbeteende visas i figur 3.15.



a) Generaliserat enfrihetsgradssystem



b) Applicerad impulslast samt elasto-plastisk respons

Figur 3.15 Generaliserat enfrihetsgradssystem belastad av en rektangulär impulslast, elasto-plastisk respons.

3.2.4.2.6 Numerisk integration

En numerisk lösning kräver att rörelseekvationen integreras numeriskt över tiden. Flera olika metoder för numerisk integration finns. Här presenteras en metod för att beskriva användandet av numerisk integration.

Den aktuella perioden som ska studeras delas in i tillräckligt små tidssteg. Inom varje sådant tidssteg antas den mothållande kraften vara konstant och beroende av det uppställda flytvillkoret. Om accelerationen och hastigheten vid starttidpunkten är kända leder integrationen under ett tidssteg till att deformationen kan bestämmas. Denna kan användas för att bestämma acceleration, hastighet och mothållande kraft vid slutet av tidssteget. Dessa värden blir indata till nästa tidssteg och integrationen upprepas för det nya tidssteget. På grund av att denna procedur upprepas kallas metoden ofta ”step by step integration method”.

När tidshistorien för den generaliserade koordinaten är beräknad kan den maximala deformationen erhållas genom transformationen,

$$v(x)_{\max} = \phi(x) * Y_{\max} \quad (3.73)$$

När den maximala deformationen är känd kan de tillhörande maximala lasteffekterna i strukturen beräknas i form av till exempel spänningar eller snittkrafter.

För ytterligare beskrivning av numerisk integration och redovisning av olika metoder vid såväl elastisk som elasto-plastisk respons hänvisas till till exempel Paz [17].

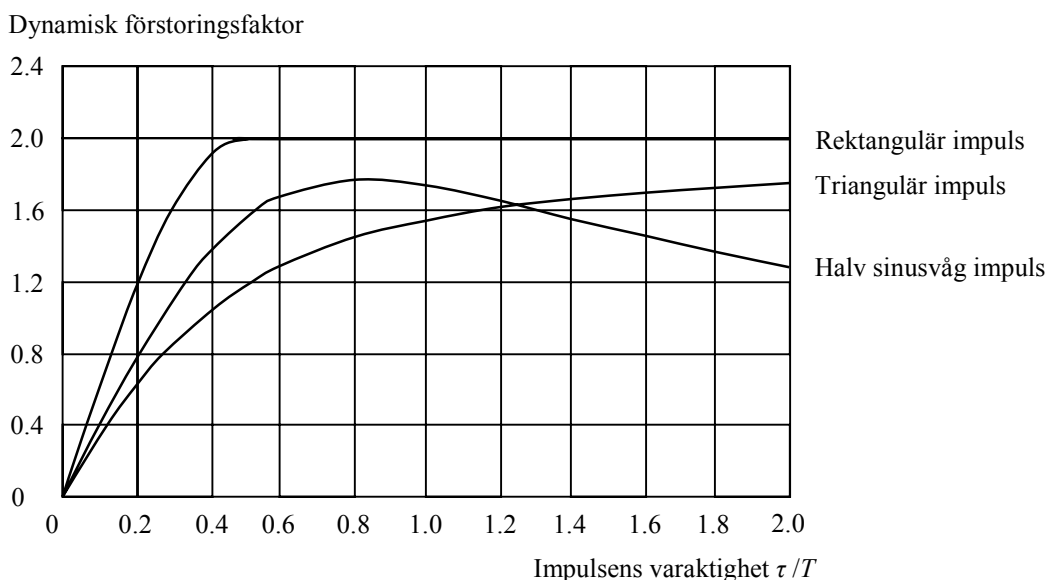
Vid val av tidssteg är det viktigt att detta väljs tillräckligt kort. En tumregel är att för ett enfrihetsgradssystem välja ett tidssteg som är mindre än en tiondel av egenfrekvensen. Dessutom måste tidssteget vara sådant att last respektive (plastisk) respons beskrivs tillräckligt noggrant.

3.2.4.2.7 Dimensioneringsdiagram

För att förenkla analysarbetet kan lösningen av rörelseekvationen med avseende på den generaliserade koordinaten redovisas grafiskt i dimensioneringsdiagram, uppställda med dimensionslösa parametrar som indata. Sådana diagram finns uppställda för elastiska system för olika enklare utseenden på impulslasten. Dessa har kompletterats så att hänsyn även kan tagas till en bilinjär arbetskurva. För specialfallet elastoplastiskt beteende har dimensioneringsdiagram framtagits av till exempel Biggs [18]. Härmed införs ytterligare ett antal dimensionslösa parametrar.

Genom att beskriva det betraktade systemet med hjälp av dimensionslösa parametrar kan alltså beteendet hos ett enfrihetsgradssystem (med generaliserade koordinater) anges grafiskt i diagramform.

För ett elastiskt material karakteriseras den dynamiska responsen av den dynamiska förstöringsfaktorn. Den erhålls ur ovan beskrivna dimensioneringsdiagram exemplifierat i figur 3.16 för några olika typer av impulslaster.



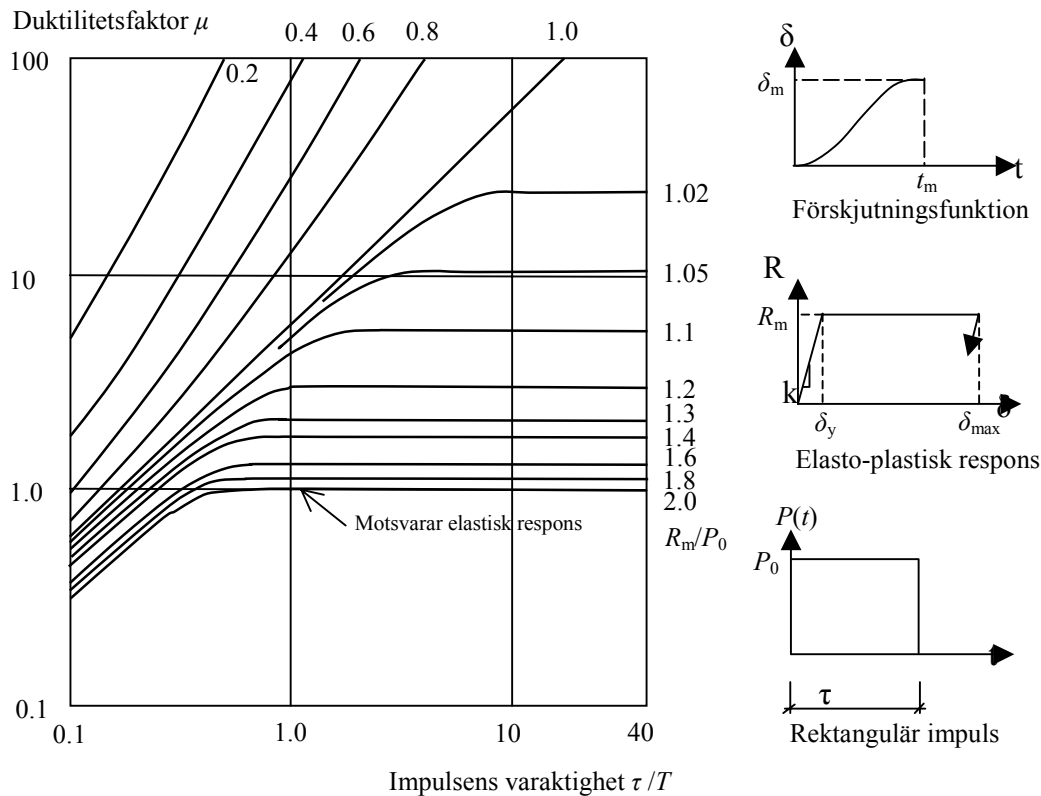
Figur 3.16 Dimensioneringsdiagram för impulslaster som belastar ett elastiskt enfrihetsgradssystem (från Biggs [18]).

Den statiska deformationen multipliceras med den ur diagrammet erhållna förstöringsfaktorn för att erhålla den maximala dynamiska responsen. Härur kan snittkrafter och spänningar etc för strukturen bestämmas.

Ur diagram för elastoplastisk respons erhålls erforderlig duktilitetsfaktor, se figur 3.17 nedan. Denna jämförs sedan med maximalt tillåten duktilitet för strukturen, dvs maximalt tillåten deformation.

3.2.4.2.8 Flerfrihetsgradsystem

För komplexa system kan strukturen beskrivas mer detaljerat vid den dynamiska analysen med hjälp av flerfrihetsgradssystem. Då används oftast datorhjälpmedel. I kapitel 4 redovisas ett exempel på en avancerad beräkningsmetodik, finita elementmetoden, för beskrivning av komplexa dynamiska system.



Figur 3.17 Dimensioneringsdiagram för impulslaster som belastar ett elasto-plastiskt enfrihetsgradssystem (från Biggs [18]).

3.3 Speciella hänsynstagande för vissa missiltyper

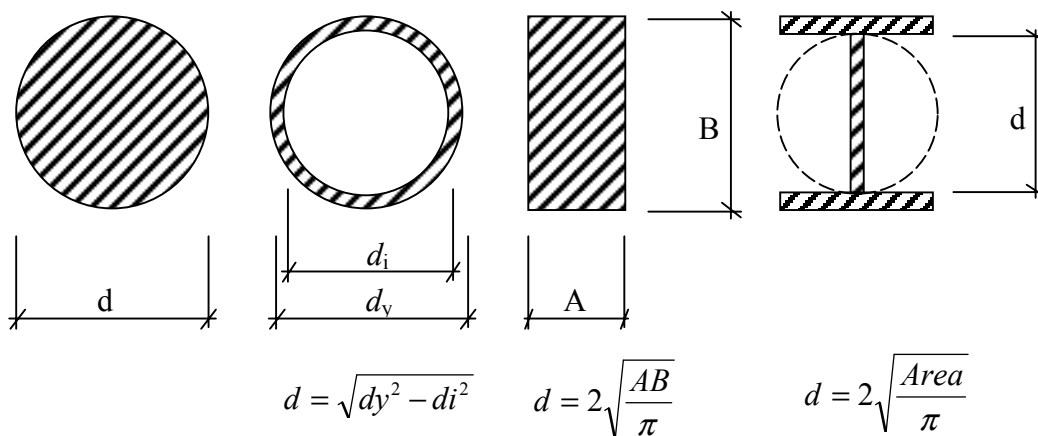
3.3.1 Allmänt

Här redovisas speciella hänsynstagande vid traditionella analyser av vissa missiltyper. Egenskaper och karakteristiska parametrar i övrigt för olika missiltyper redovisas i kapitel 2.

3.3.2 Tornados

Massiva stålstänger kan ofta behandlas som odeformerbara missiler. Stålrör är delvis eftergivliga och anpassning har därför försökt göras mellan samband uppställda för odeformerbara missiler och försöksresultat med stålrörsmissiler. Enligt ASCE [16] erhålls god överensstämmelse för lokal respons hos betongstrukturer vid användning av modified NDRC formula, om penetrationsdjupet bestäms med hjälp av rörets ytterdiameter samtidigt som effektiv diameter (figur 3.18) används i sambanden för genomslag och utstötning. För stålstänger med andra tvärsnittsformer utnyttjas ibland effektiv diameter enligt figur 3.18.

Vid försök med trästolpar har det visat sig att stor del av missilens energi förbrukas vid krossning av stolpens ände och att betongstrukturen därmed ej uppvisar några större skador. Trästolpar förefaller därför ej vara dimensionerande utan deras eventuellt skadliga inverkan på strukturen täcks in av dimensioneringen med avseende på missiler av stål.



Figur 3.18 Effektiv diameter för stålstänger (från Kar [19]).

Bilar är mycket deformerbara. För att få realistiska krav både vid lokal och global respons hos konstruktionen bör denna deformerbarhet beaktas. I princip kan samma metod som redovisas för störtande flygplan användas, se avsnitt 3.3.3. Bilmissilen träffar en större yta av strukturen och har samtidigt sådan vikt och hastighet att genomstansningsbrott kan vara dimensionerande, jämför avsnitt 3.3.4.

För betongkonstruktioner som träffas av bilmissiler kan det ofta vara den globala responsen som är kritisk, medan det för övriga tornadogenererade missiler ofta är den lokala responsen som bestämmer erforderlig konstruktionstjocklek.

För belastningar från tornados kan det erfordras att strukturen dimensioneras för samtidigt verkande hastighetstryck på grund av vinden kombinerat med en genererad missil.

3.3.3 Störtande flygplan

Flygplanskroppen, förutom motorn, är att betrakta som en mycket deformerbar struktur. Eftersom ett störtande flygplan har både mycket hög vikt och hastighet är det nödvändigt att ta hänsyn till flygplanskroppens plastiska, och eventuellt även dess elastiska, deformation vid islag. Flygplansmotorn däremot uppvisar liten plastisk deformation och kan behandlas som en ”vanlig” missil enligt avsnitt 3.2.

Metoder har utvecklats för att bestämma kraft-tidssamband som kan användas för analys av den träffade strukturen. Dessa metoder tar hänsyn till flygplanskroppens plastiska deformation men förutsätter oftast att träffad struktur är oeftergivlig. Undersökningar visar att modellering av den träffade strukturen som oeftergivlig är ett konservativt antagande.

Kraften som påverkar en oeftergivlig struktur träffad av en mycket deformerbar missil består av två delar. Den första delen motsvarar den kraft som erfordras för att deformera missilen medan den andra beror av tröghetskrafterna, dvs förändringen (över tiden) av missilens rörelsemängd. Följande uttryck kan härmed uppställas,

$$F = F_{def} + \rho v^2 \quad (3.74)$$

F = kraft som verkar mot den oeftergivliga strukturen

F_{def} = kraft som erfordras för att deformera missilen, varierar längs flygplanskroppens längd

ρ = massa per längdenhet för den odeformerade delen av missilen (vid kontaktytan mot den oeftergivliga strukturen)

v = hastighet hos den odeformerade delen av missilen

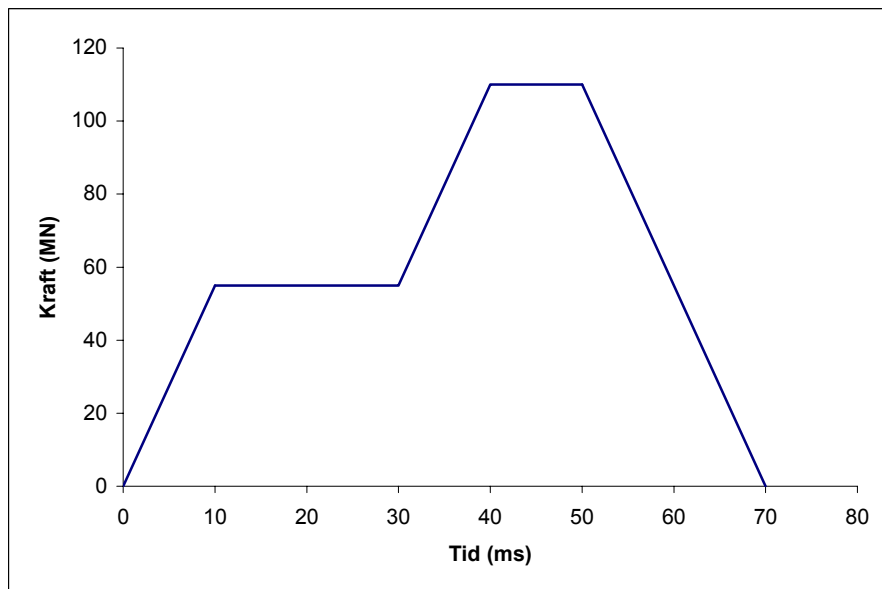
F_{def} och ρ är funktioner av den deformerade längden hos missilen, x , som i sin tur är en funktion av tiden t . Insättning av den deformerade längden x i ekvation (3.74) samt användandet av definitionen på hastighet ger,

$$F(t) = F_{\text{def}} + \rho \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 \quad (3.75)$$

Eftersom ekvation (3.75) är en icke-linjär differentialekvation och F_{def} och ρ ej nödvändigtvis är enkla funktioner används vanliga numeriska lösningsmetoder för att bestämma kraft-tidssambandet F .

Vid analys av strukturens hållfasthet (förmåga att motstå en flygplansmissil) kan det framräknade kraft-tidssambandet utjämnas för att förenkla analysen, dock bör den maximala belastning ej sänkas. Vid framtagande av sekundärresponspektra däremot, bör det detaljerade utseendet på kraft-tidssambandet användas kombinerat med detaljerade dynamiska analysmetoder för den träffade strukturen. Sekundärresponspektrat används för kontroll av system och komponenter monterade i anläggningen.

I figur 3.19 visas ett exempel på ett utjämnat kraft-tidssamband hämtat ur Bangash [9].



Figur 3.19 Exempel på utjämnat kraft-tidssamband för störtande flygplanskropp träffande struktur (från Bangash [9]).

Det finns två stora skillnader mellan ovanstående metod och hanteringen av en deformierbar missil i avsnitt 3.2. För det första, för flygplanskroppen antas att den deformerbara delen av missilen har en massa, medan den i avsnitt 3.2 antogs vara viktlös (massan koncentrerades där till en punkt bakom den deformerbara zonen, jämför figur 3.5). För det andra, den kraft som erfordras för att deformera missilen är ej konstant, utan varierar längs missilen (flygplanskroppen).

3.3.4 Hanteringsmissöden

Tappade föremål kännetecknas ofta av att de har en låg hastighet kombinerat med en relativt stor vikt. Missilens kontaktyta vid islag mot bjälklaget är vanligtvis stor i förhållande till bjälklagets tjocklek. För denna typ av belastning visar försöksresultat att

genomstansningsbrott, dvs utstötning av en genomgående brottkon, kan vara dimensionerande i förhållande till andra lokala fenomen.

Det innebär att bestämning av erforderlig tjocklek genom att förhindra genomslag eller utstötning på baksidan, till exempel beräknad med hjälp av modified NDRC formula, ej nödvändigtvis är på säkra sidan.

Vidare har visats, Sinclair [20], att lokal krossning av betongen ej uppstår om islaget sker ”på flatan” med tillräckligt stor kontaktyta. Mycket ungefärligt kan, baserat på försök, sägas att denna gräns är av storleksordningen,

$$\frac{d}{H} \geq 2.5 - 3.0 \quad (3.76)$$

d = kontaktytans diameter

H = betongbjälklagets tjocklek

Det innebär att ingen energi förbrukas på grund av lokal krossning av betongen vid islag på flatan. Vid träff med ett hörn först sker en lokal krossning innan en större del av missilen kommer i kontakt med bjälklaget. Den lokala krossningen fortgår tills kontaktytan uppnår ovanstående gränsvärde varefter ett genomstansningsbrott kan uppstå.

Vid ovan beskrivna beteende kan följande principiella förenklade energibetraktelse för lokalt brott uppställas, om elastisk energiupptagning försummas,

$$T_{mis} + mgh = V_{kro} + V_{kon} + V_{res} \quad (3.77)$$

T_{mis} = missilens kinetiska energi

h = brottkonens förskjutning

V_{kro} = energi som åtgår vid lokal krossning av betongen

V_{kon} = energi som åtgår för att en genomgående brottkon ska uppstå

V_{res} = residualenergi som förbrukas vid ytterligare förskjutning av brottkonen under plastisk deformation av armeringen samt fragmentering av brottkonen

Vid islag med ett hörn först ökar strukturens kapacitet på grund av ovan nämnda krossning, som fungerar som ”stötdämpare”. Om islaget dessutom sker excentriskt uppstår ytterligare ett för strukturen gynnsammare beteende på grund av deformation hos och rotation av missilen.

För tyngre tappade föremål är ofta den globala responsen av större betydelse än den lokala.

Transportbehållare för använt bränsle är oftast försedd med stötdämpare så att den efter ett transportmissöde fortfarande är intakt. Vid kontroll av strukturens beteende bör stötdämparen ingå vid modelleringen för att ett realistiskt resultat på strukturens respons ska erhållas.

Om föremål tappas i bassänger kan hänsyn tas till ”drag and bouyancy” vid beräkning av islagshastigheten mot bassängbotten.

Krav och förutsättningar för analys av påkörning med fordon mot byggnadskonstruktioner redovisas i det normala regelverket för byggnadskonstruktioner med tillhörande publikationer, exempelvis BKR 94 [6], Boverkets handbok Svängningar, deformationer och olyckslast [21], Eurocode Part 2-7 (ENV 1991-2-7:1998) [22] med tillhörande bakgrundsdokument, samt artikeln Dimensionering för påkörning och andra dynamiska laster av von Essen/Sundqvist [23].

I BKR [24] och därtill hörande handbok Svängningar, deformationspåverkan och olyckslast [21] anges statiska ekvivalentlaster för påkörning av olika typer av fordon i olika miljöer, från personbilstrafik i P-hus till tyngre fordon trafikerande huvudtrafikled. Dessa värden bygger på redovisad antagen massa och hastighet för fordonet, se tabell 3.4. I ENV 1991-2-7:1998 [22] och tillhörande bakgrundsdocument finns motsvarande värden redovisade samt en sammanställning av lastvärden från olika europeiska länder. Bakomliggande antaganden och teoretiska resonemang finns också redovisade.

I von Essen/Sundqvist [23] redovisas en noggrann teoretisk analys av stötförloppet vid påkörning.

Fall	Massa	Hastighet	Rörelse- energi	Stötkraft	TP:s förflyttning	
	ton	km/h	m/s	kNm	kN	m
Invid huvudtrafikled	40	50	13.9	4000	1500	2.70
Trafik med låg hastighet	10	30	8.3	350	400	0.90
Inom byggnad där trafik kan förekomma	10	10	2.8	40	150	0.25
I parkeringshus för personbilar	1.5	10	2.8	6	40	0.15

Tabell 3.4 Exempel på statisk ekvivalentlast vid påkörning med fordon (från Boverkets handbok [21]).

3.3.5 Rörbrott

3.3.5.1 Allmänt

Det brott som ger upphov till en rörmisil är oftast av typ giljotinbrott. Den drivande kraften på en rörmisil vid denna typ av rörbrott är den dynamiska lasten i röränden orsakad av den utströmmande fluiden. Denna last består av två delar, en initiell transient last med kort varaktighet (vågkraft), beroende på tryckvågor i rörsystemet, samt en långvarig last (impulskraft) på grund av impulsen i den utströmmande fluiden. För en utförligare beskrivning av laster vid brottsnittet se avsnitt 4.3.4.2. Typisk varaktighet för vågkraften är av storleksordningen tiotalet millisekunder och för impulskraften någon sekund. Dessa pådrivande laster bestäms genom en separat analys av det trycksatta rörsystemet och antas kända då rörbrottsmissilanalysen påbörjas. Det är vanligt att vid traditionell analys förenkla beräkningen genom att ansätta en konstant verkande last mot rörbrottsänden.

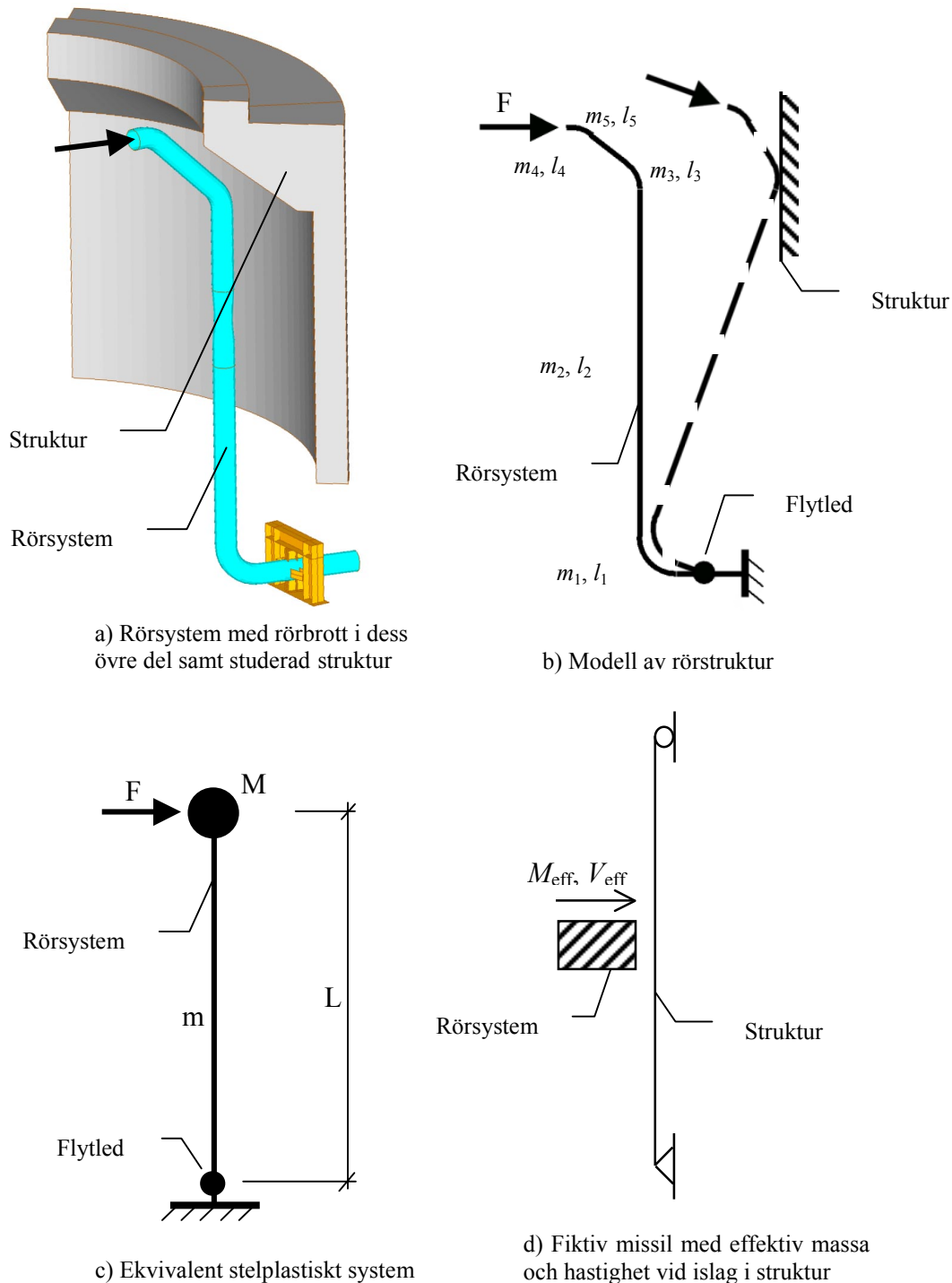
3.3.5.2 Beteende före islag

Traditionellt har man beaktat rörslag genom att dimensionera träffad struktur för en fiktiv misil med en effektiv massa och hastighet. En från början tredimensionell rörstruktur kan till exempel översättas till ett ekvivalent stelplastiskt system varur man kan bestämma massa och hastighet för den fiktiva missilen, se figur 3.20;

I a) visas ett rörsystem där ett rörbrott precis har inträffat i övre delen. Detta rörsystem kommer att slå i betraktad struktur. En modell av rörsystem och betraktad struktur uppställs, se b). Ur detta system kan parametrar för ett ekvivalent stelplastiskt system enligt c) uppställas varvid effektiv massa och hastighet för den fiktiva missilen bestäms.

Den fiktiva missilen antas därefter belasta studerad struktur, se d), som modelleras med tillräcklig noggrannhet.

Denna metod är möjlig att tillämpa på tredimensionella rörsystem, men på grund av den tidskrävande och arbetsamma diskretiseringen är det vanligast att metoden endast tillämpas för plana rörstrukturer.



Figur 3.20 Förenkling av ett tredimensionellt rörsystem till en fiktiv missil.

För fall med rörsystem med mycket enkel geometri kan dessa oftast beskrivas enligt figur 3.21. En konstant kraft F ansätts approximativt att verka på röränden vid

rörbrottet. Ekvivalent massa M_{eff} kan då bestämmas enligt följande. Masströghetsmomentet J_{ekv} för det ekvivalenta systemet kan tecknas såsom,

$$J_{\text{ekv}} = ML^2 + \frac{1}{12}mL^3 + mL\left(\frac{L}{2}\right)^2 + \frac{1}{16}mL(d_y^2 + d_i^2) \quad (3.78)$$

M = koncentrerad massa vid rörände av rörkrök och eventuell ventil eller liknande

m = rörets massa per längdmeter

L = längd från rörände till flyttled

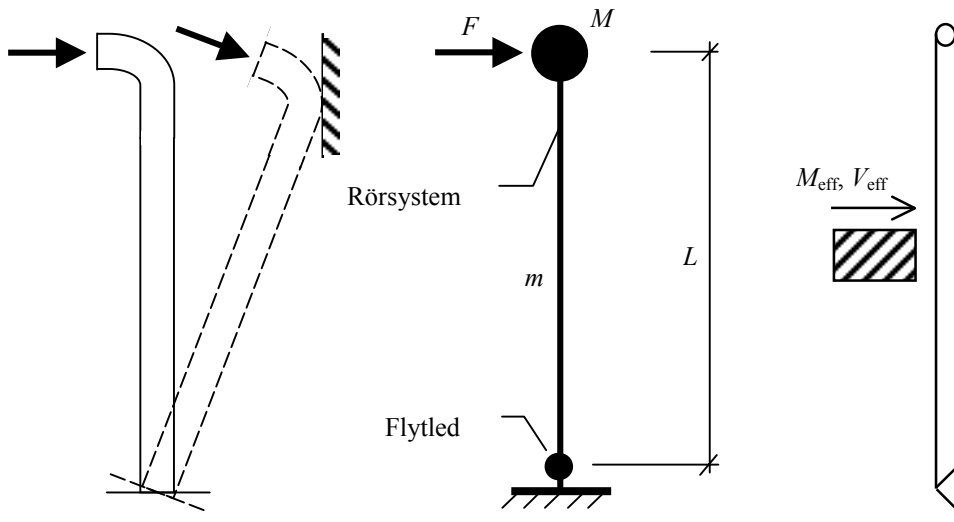
d_y, d_i = rörets ytter- respektive innerdiameter

där den sista termen på höger sida beror av tvärsnittets rotationströghet. Denna term kan försummas varvid masströghetsmomentet efter förenkling blir,

$$J_{\text{ekv}} = ML^2 + \frac{1}{3}mL^3 \quad (3.79)$$

Den effektiva massan M_{eff} blir då,

$$M_{\text{eff}} = \frac{J_{\text{ekv}}}{L^2} = M + \frac{1}{3}mL \quad (3.80)$$



Figur 3.21 Rörsystem med mycket enkel geometri.

Den effektiva hastigheten V_{eff} för den fiktiva missilen kan bestämmas genom att sätta den kinetiska energin lika med arbetet som utförs av rörsystemet vid förflyttningen från dess ursprungliga position tills dess den slår i strukturen. Den kinetiska energin är,

$$T = \frac{1}{2}J_{\text{ekv}}\omega^2 \quad (3.81)$$

ω = vinkeländringshastighet för rörsystemet

och arbetet som utförs,

$$W = FL\theta - M_{\text{pl}}\theta \quad (3.82)$$

θ = vinkeländring för rörsystemet

M_{pl} = plastisk momentkapacitet för rörets flyttled

Om ekvation (3.81) sätts lika med ekvation (3.82) kan ω lösas ut,

$$\omega = \sqrt{\frac{2(F L - M_p) \theta}{J_{ekv}}} \quad (3.83)$$

Den fiktiva missilens effektiva hastighet V_{eff} kan då bestämmas ur sambandet,

$$V_{eff} = L \omega \quad (3.84)$$

under förutsättningen att radien för rörändens krökning är liten.

Flytledens läge, dvs avståndet L ovan, begränsas av avståndet till eventuella stöd, $L_{stöd}$, eller avståndet till den statiska rotationspunkten, L_{stat} . Om flytledens (initiella) läge ej begränsas av $L_{stöd}$ eller L_{stat} kan det visas, genom en dynamisk jämviktsbetraktelse, att den kommer att uppstå på avståndet L_p från röränden,

$$L_p = \frac{3}{2} \frac{M_p}{F} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{8}{3} \frac{F}{M_p} \frac{M}{\rho}} \right) \quad (3.85)$$

ρ = densitet för röret

Ovan beräknade läge på flytleden gäller strikt endast initieellt, dvs när rörets vinkeländring θ är noll. När röret roterar, dvs $\theta > 0$, förskjuts flytledsläget längre och längre från röränden till dess $L_{stöd}$ eller L_{stat} uppnås. Detta beteende kallas för en vandrande flytled. Om normalkraftens inverkan på systemet kan försummas uppstår den vandrande flytleden ej.

En vandrande flytled kan också uppstå om påförd kraft mot röränden plötsligt minskar kraftigt eller upphör, vilket ofta är fallet vid rörbrott, eller om effekten av stora deformationer är tillräckligt stor.

Vid mer komplicerade geometrier har FE-modeller, företrädesvis med balkelement, använts för att analysera rörsystemets beteende före islag. Mer avancerade FE-metoder beskrivs i kapitel 4.

I ovan beskrivna modell görs en mängd förenklingar såsom förenklad geometri, antagandet av en konstant pådrivande kraft F , beskrivning av rörsystemet med en stelplastisk modell med liten deformation, samt att normalkraftens inverkan försummas.

Effekter som påverkar rörsystemets beteende, men som ej enkelt kan beaktas, är ovalisering av röret vid större vinkeländringar (se figur 4.4a), den uppstyvande effekten på röret av det inre trycket samt materialparametrarnas beroende av töjningshastigheten.

Mer avancerade modeller kan uppställas där även hänsyn till en eller flera av ovanstående effekter tas. Komplexiteten i beräkningarna ökar dock snabbt och numeriska lösningsmetoder blir i de flesta fall helt nödvändiga.

3.3.5.3 Lokal och global respons vid islag

Missiler vid rörbrott är unika på grund av beteendet före islag, på grund av svårigheten att definiera anslagsytans storlek och form, samt på grund av missilens deformerbarhet vid islag.

Beteendet före islag har diskuterats i avsnitt 3.3.5.2 ovan, varvid den fiktiva missilens effektiv massa och hastighet kunde bestämmas.

På grund av rörets geometri, islagsriktning och deformation, se figur 4.4.b, är det svårt att entydigt bestämma anslagsytans form och storlek i förhållande till de empiriska samband som beskriver lokal respons. Försök har utförts för att anpassa dessa parametrar så att överensstämmelse erhålls mellan rörbrottsmissiler och empiriska samband för lokal respons beskrivna i avsnitt 3.2. Ett exempel på en sådan anpassning är att använda en effektiv diameter vid kontroll av lokal respons beräknad enligt följande,

$$d = \sqrt{2r_y} \quad (3.86)$$

r_y = rörets ytterradie

Rörets relativt stora deformerbarhet (figur 4.4.b) kommer också att inverka både på lokal och global strukturens respons genom att missilens deformationen förbrukar energi. Detta reducerar strukturens respons när den träffas av rörbrottsmissilen.

Rörbrottsmissilen har ofta relativt låg islagshastighet, särskilt vid litet avstånd mellan rör och träffad struktur, och stor anslagsyta. Därför kan genomstansningsbrott ofta vara dimensionerande, jämför avsnitt 3.3.4 ovan.

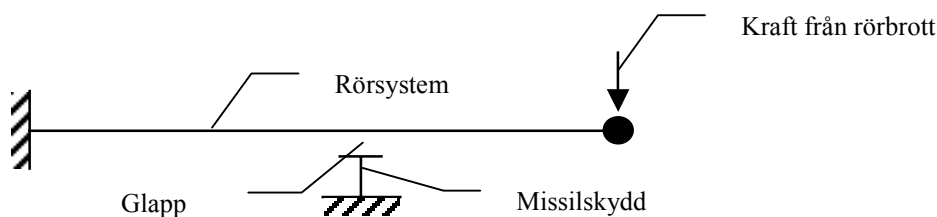
Vid rörbrott uppträder flera samtidigt verkande laster mot strukturen, se avsnitt 2.3.2.6.

3.3.5.4 Missilskydd och rörbrottsförankring

Högenergisystem i kärntekniska anläggningar är ofta försedda med rörbrottsförankringar och missilskydd. Dessa ska vid ett rörbrott förhindra oönskade deformationer av rörsystemet samt skydda strukturer, komponenter eller system. Hänsyn till inverkan av missilskydd och förankringar måste givetvis tas vid analys av rörbrottsmissilers beteende. Oftast belastas dessa konstruktioner vid rörbrott så mycket att de uppvisar ett plastiskt beteende.

Missilskydd och rörbrottsförankringar är oftast utformade så att det finns ett glapp mellan rör och skydd. En anledning till detta är att rörets deformationer under drift, på grund av till exempel temperaturrörelser, ej ska förhindras.

För mycket enkla geometrier, till exempel enligt figur 3.22, har förenklade beräkningsmetoder uppställts.



Figur 3.22 Rörsystem och missilskydd med mycket enkel geometri.

På senare år har även enklare FE-modeller med balkelement börjat användas, där missilskyddens/rörbrottsförankringarnas inverkan ofta har modellerats med olika typer av fjädrar.

Med dagens avancerade FE-metoder kan man utan problem beskriva ett rörsystems samverkan med missilskydd/rörbrottsförankringar, företrädesvis med hjälp av skalelement och kontaktformuleringar. Detta redovisas utförligare i kapitel 4.

Utöver studiet av rörsystem/missilskydd och träffad struktur måste även missilskyddens infästningar och deras bakomliggande struktur kontrolleras för uppträdande belastningar.

3.4 Traditionella analysmetoders tillämplighet

Traditionella analysmetoder är för mindre komplicerade system enkla och relativt snabba att använda, medan de för komplicerade system kan vara mycket tidskrävande. Vid studie av mer komplicerade system måste också oftast flera tveksamma konservativa antaganden göras, vilket gör att analysresultatet blir behäftat med stora osäkerheter och att risk finns att felaktiga slutsatser dras.

Komplexiteten i betraktat system kan vara så stor att man ej med traditionella metoder fångar in avgörande beteenden hos systemet. Ett exempel på detta framgår av figur 4.3, där förskjutningen hos ett rörsystem vid rörbrott blir så stort att missilskyddsskon glider ur missilskyddet och hela systemets deformationsbeteende plötsligt förändras.

Emellertid bör framhållas att för de fall där de traditionella analysmetoderna ej är lämpliga att användas vid den slutliga dimensioneringen, kan de fungera bra såsom överslag och inledande ansatser samt som kontroll av rimligheten av resultatet från mer avancerade datorsimuleringar.

Vid dimensionering med stöd av traditionella analysmetoder summeras en rad olika konservativa antaganden och förenklingar till varandra, se nedan. Detta kan ge upphov till en onödigt stor konservatism vid dimensionering eller kontrollberäkning för missilgenererade lasteffekter i kärntekniska anläggningar. Enligt EPRI [25] kan till exempel för rörbrottsmissiler en upp till 5 ggr för stor stötkraft mot strukturen erhållas vid användandet av konservativa traditionella analysmetoder än vad som framgår av motsvarande resultat från utförda tester.

I vissa fall kan denna konservatism till och med medföra en minskad total anläggningssäkerhet. Exempelvis vid hänsynstagande till rörbrottsmissiler där alltför konservativa antaganden har medfört installation av rörbrottsförankringar eller missilskydd som försvårar inspektion, kontroll och underhåll av anläggningens säkerhetssystem. Felaktigt placerade förankringar/skydd kan också ge upphov till ett icke önskat beteende hos rörbrottsmissilen.

Vid användandet av traditionella analysmetoder införs, som ovan nämnts, ett flertal konservativa antaganden och förenklingar. Här nedan ges exempel på sådana förenklingar,

- Rak central stöt antas, med missilens längdriktning sammanfallande med stötnormalen.
- Missilträff vinkelrätt mot strukturen antas.
- Plastisk deformation av missilen vid islag försummas.
- Den träffade strukturens deformation försummas vid islag.
- En förenklad dynamisk analys av träffad struktur används.
- Lokal energiupptagning försummas vid global analys och vice versa.
- Samverkan mellan missil och struktur beaktas ej. Först beräknas missilens beteende och den last mot strukturen som uppkommer. Därefter anbringas lasten mot strukturen varefter lasteffekterna beräknas.

- Friktion mellan missil och träffad struktur försummas.
- Förenklad geometribeskrivning av rörbrottsmissil samt ersättning av rörsystemet med en fiktiv missil.
- En konstant pådrivande kraft vid rörbrottsänden antas under hela missilförloppet.
- Både övertrycket i röret och stålets beroende av töjningshastigheten har en uppstyvande effekt på rörbrottsmissilens beteende före islag. Om dessa effekter försummas erhålls en för hög islagshastighet.

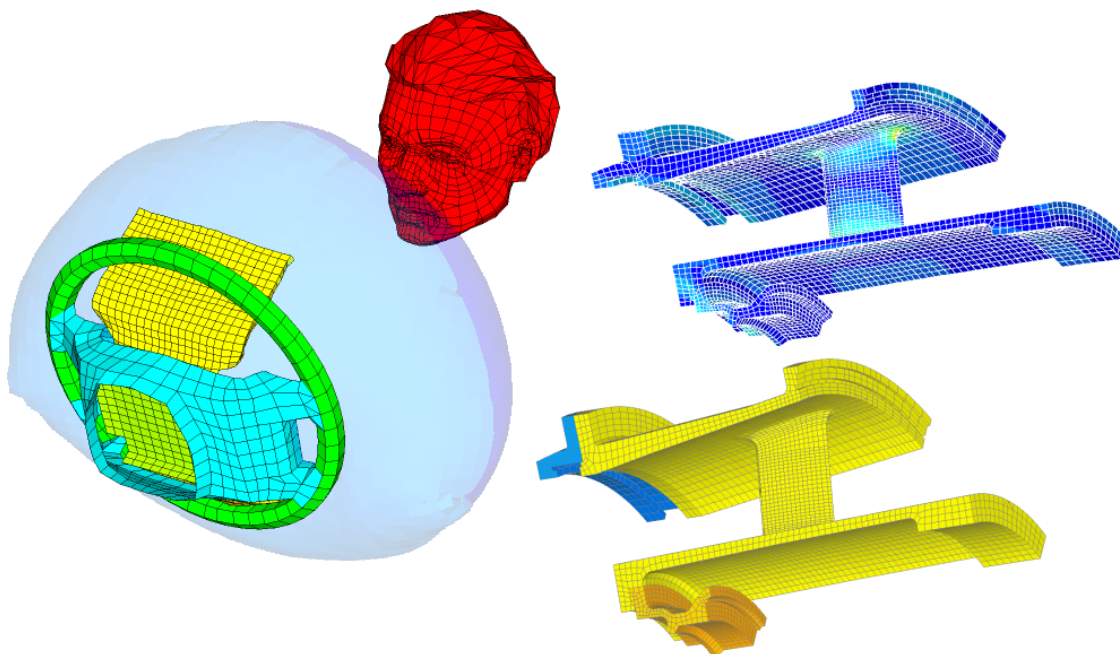
Flera av de konservativa antaganden och förenklingarna som görs i traditionella analyser kan elimineras genom användande av moderna avancerade analysmetoder, se kapitel 4.

Sammanfattningsvis kan konstateras att det är viktigt att rätt analysmetod väljs utifrån betraktat systems komplexitet och syftet med analysen. Varken en för enkel eller en för komplicerad analysmetodik bör väljas.

4. Moderna analysmetoder baserade på finit elementteknik

4.1 Allmänt

Strukturdynamiska problemställningar kan idag analyseras med hjälp av helt andra metoder än under 1970- och 1980-talen, då konstruktionsprocessen för de svenska kärntekniska anläggningarna genomfördes. Utvecklingen av programvaruverktyg baserade på finit elementteknik (FE-teknik) har gått hand i hand med den extremt kraftfulla utbyggnaden av datorberäkningskapaciteten. FE-metoden är idag ett självklart redskap för hantering av komplexa problemställningar inom nästan all teknisk industriverksamhet. Figur 4.1 nedan visar exempel på användning av FE-metoden för simulering av air-bag utlösning, samt optimering av maskinelement.



Figur 4.1 Exempel på användningsområden för finita elementmetoden.

FE-metoden är emellertid kunskapsintensiv och kräver att användaren är väl insatt i den grundläggande teorin, samt har en mycket god insikt i de tekniska problemställningar som ska analyseras i det aktuella fallet. Felaktig användning leder otvivelaktigt till icke tillförlitliga eller direkt felaktiga resultat.

Missilgenererade händelseförlopp karakteriseras typiskt av rörelseenergi, kontaktfenomen mellan strukturdelar, stora deformationer, plasticering och lokala skador. Vissa moderna FE-program har stöd för hantering av dessa speciella fysikaliska samband som föreligger då missileffekter uppstår.

Användandet av modern FE-teknik vid analys av missileffekter inom kärntekniska anläggningar kan reducera allt för grova och schablonmässiga beräkningsantaganden. Därigenom erhålls ett tekniskt beslutsunderlag som möjliggör konstruktionslösningar av hög kvalitet i anläggningarna. Härvid kan man optimalt beakta de acceptanskriterier

som uppställts för den missilgenererade händelsen men samtidigt även beakta krav på tillgänglighet för inspektion, kontroll och underhåll av anläggningens säkerhetssystem.

I följande avsnitt beskrivs hur finita elementmetoden idag kan användas för att analysera missilgenererade händelseförlopp i kärntekniska anläggningar. Olika aspekter på teknikens tillämpning illustreras med exempel. Flertalet av dessa exempel är hämtade från rörbrottshändelser, men metoden är generellt användbar även vid simulering av andra händelseförlopp som inkluderar missilgenererade lasteffekter.

4.2 Metodik vid analys av missilgenererade lasteffekter

4.2.1 Allmänt

I detta avsnitt presenteras en metodik baserad på finit elementteknik som kan användas för analys av händelser som inkluderar missilgenererade lasteffekter. Speciellt fokuseras härvid på hur händelseförloppet kan simuleras och på hur FE-tekniken kan användas för att verifiera att ställda krav på erforderliga säkerhetsfunktioner är uppfyllda.

Enkelt uttryckt ska analysen med tillräcklig noggrannhet kunna beskriva missilens beteende samt dess resulterande lasteffekter. Vidare ska det kunna klarläggas att de säkerhetsfunktioner som krediteras vid den aktuella händelsen kan upprätthållas med betryggande säkerhet. För den händelse att analysen utvisar att konsekvenserna med avseende på anläggningens säkerhet inte är acceptabla kan analysmetoden användas för bedömning av lämpligt åtgärdsbehov. Vald åtgärd kan sedan införas och verifieras i en förnyad analys.

De olika ingående stegen i analysmetoden beskrivs i följande avsnitt.

4.2.2 Analysens syfte och avgränsningar

Det är viktigt att inledningsvis ställa upp alla förutsättningar och ingående parametrar för analysens genomförande, samt att tydligt definiera analysens syfte. Vid uppstart måste det finnas väldokumenterade säkerhetsanalyser tillgängliga i vilka de aktuella händelseförloppen och förutsättningarna i övrigt finns beskrivna. Problemställningen måste avgränsas med avseende på vilka händelser eller händelsesekvenser som ska studeras, samt vilka kriterier för värdering och redovisning av anläggningens säkerhet som ska gälla. Krav på analysmetoden måste ställas upp och osäkerheter i analysprocessen identifieras. Gransknings- och verifieringsrutiner för analysens olika steg måste definieras.

4.2.3 Beskrivning av inledande händelse

Den inledande händelsen som ska studeras måste beskrivas noggrant. Utifrån gällande konstruktionsförutsättningar i anläggningens säkerhetsredovisning samt genomförda säkerhetsanalyser uppställs förutsättningarna för den inledande händelsen.

Beskrivningen av den inledande händelsen kan kräva mycket arbete. Exempelvis om händelsen är rörbrott på ett högenergisystem kan eventuellt arbetet även inkludera att bestämma i vilka rörbrottspositioner som analys kan erfordras. När väl dessa positioner har bestämts måste förutsättningarna i övrigt för framtagning av rörbrottskrafter i dessa

positioner bestämmas, alternativt utnyttja godkänd dokumentation som beskriver dessa krafter som funktion av tiden efter brott.

För andra typer av händelser kan förutsättningarna för missilen definieras enklare. Som regel måste det åtminstone finnas uppgifter om missilens massa och form, utgångsposition och hastighet.

En annan viktig förutsättning som måste redas ut är hur missileffekterna ska kombineras med andra effekter till följd av samtidigt uppkomna laster vid den aktuella händelsen.

4.2.4 Identifiering av säkerhetssystem och acceptanskriterier

För att uppnå en balanserad riskprofil för kärntekniska anläggningar, indelas olika driftssituationer och händelser vid kärntekniska anläggningar i olika händelseklasser, se vidare avsnitt 2.1. Inom varje sådan händelseklass gäller samma acceptanskriterier för samtliga händelser.

Nästa steg i analysen blir därför att identifiera de säkerhetssystem som måste fungera vid händelsen för att kunna ställa upp relevanta acceptanskriterier för verifiering. Med utgångspunkt från den aktuella händelsen och dess händelseklass kan ett antal frågor ställas upp:

- Vilka säkerhetsfunktioner krediteras vid den aktuella händelsen?
- Vilka system upprätthåller dessa säkerhetsfunktioner?
- Vilka acceptanskriterier måste visas vara uppfyllda för respektive sådant system?

För den händelse som skall analyseras, identifieras de säkerhetsfunktioner som måste vara verksamma vid den aktuella händelsen. Varje säkerhetsfunktion tillgodoses av ett eller flera system under händelsen. Med system kan här avses även byggnadsdelar eller komponenter som uppbär säkerhetsfunktioner. I detta sammanhang utsträcks begreppet säkerhetsfunktion till att avse både *funktion* och *integritet*. Exempelvis måste vid ett rörbrott på en huvudångledning innanför inneslutningen *funktionen* härdsnödkylning vara säkerställd, men inte nödvändigtvis funktionen i matarvattensystemet. Däremot måste eventuellt *integriteten* hos matarvattensystemet vara intakt, för att inte ett större övertryck i inneslutningen ska uppstå än vad som gäller såsom konstruktionsförutsättning vid den aktuella händelsen. Detta har betydelse vid uppställning av acceptanskriterier för respektive system, eftersom kraven blir olika vid endast bibehållen integritet jämfört med upprätthållen funktion.

Baserat på gällande normer och krav kan acceptanskriterierna formuleras för varje sådant system. Syftet härvid är att klargöra vilka acceptanskriterier som måste visas vara uppfyllda och hur detta ska kunna verifieras i beräkningsanalysen.

4.2.5 Generering av strukturmodell samt strukturanalys

Nästa steg i analysen är att generera en finit elementmodell av den aktuella strukturen. Styrande för utformningen är att på ett tillräckligt noggrant sätt, dels kunna simulera missilens och strukturens beteende och dels kunna verifiera att acceptanskriterierna för erforderliga säkerhetssystem är uppfyllda. I modellen måste därvid speciella aspekter avseende geometri, material, laster, randvillkor och kontaktvillkor beaktas, se vidare avsnitt 4.3.

Efter det att modellen definierats genomförs strukturanalysen. De förutsättningarna som motsvarar normal drift påförs modellen, varefter händelseförloppet simuleras. Det är

viktigt att resultatets känslighet med avseende på ingående parametrar studeras, se vidare om detta i avsnitt 4.3.7.

4.2.6 Säkerhetsvärdering-åtgärdsbehov

De genomförda strukturanalyserna ska utgöra underlag för en säkerhetsvärdering av anläggningen vid den aktuella händelsen. Härvid ska det kunna visas att krediterade säkerhetsfunktioner upprätthålls. Detta görs genom att med stöd av analysresultatet verifiera att de krav som uppställts för respektive system är uppfyllda.

För den händelse att kraven inte visar sig vara uppfyllda, identifieras bristerna i den befintliga konstruktionen, varefter beräkningsmodellen med fördel kan användas för att göra bedömningar och verifiering av åtgärdsbehov, samt att ta fram förslag till optimala konstruktionslösningar.

Beträffande olika aspekter på säkerhetsvärdering av anläggningar utifrån resultat från en finit elementanalys, se avsnitt 4.4.

4.3 Aspekter på strukturmodellering och analys

4.3.1 Allmänt

Resultatets kvalitet vid dynamisk analys styrs i högre grad än vid statisk analys av de förutsättningar som utgjort underlag för beräkningsmodellens utformning. Härvid är det av största vikt att noggrant avväga aspekter rörande geometriska förenklingar, materialegenskaper, strukturella avgränsningar och randvillkor. Vidare måste förutsättningar avseende laster och eventuella missilers hastigheter bestämmas noggrant. I följande avsnitt behandlas olika frågeställningar som bör behandlas vid användning av FE-teknik för analys av händelser som inkluderar missilgenererade laster.

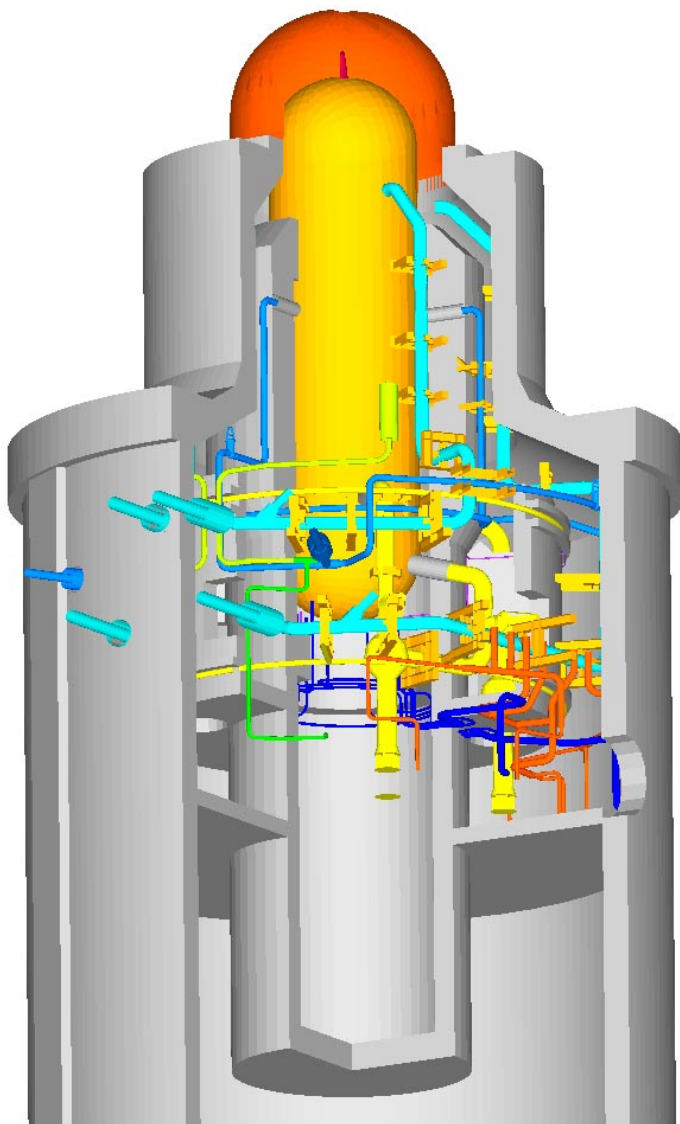
4.3.2 Geometri

Med hjälp av FE-teknik ges möjlighet att detaljerat beskriva geometriska villkor även hos komplexa strukturer, exemplifierat i figur 4.2 nedan. Den snabba utvecklingen de senaste åren av CAD-produkter och preprocessorer till FE-programvaror gör det möjligt att modellera även mycket komplicerade geometrier.

Förenklingar och geometriska avgränsningar måste dock självklart utnyttjas även när modern FE-teknik används. Vid analyser som involverar missiler kan det ofta vara konservativt att utelämna strukturer som marginellt påverkar missilens rörelse. Vad som här avses är exempelvis gallerdurkar, klenrörssystem och komponenter som inte på ett avgörande sätt påverkar analysresultatet. Dock måste en missilstudie inkludera bedömning av risken för att icke-försumbara sekundära missiler uppkommer.

Vid dynamisk analys och stora deformationer är det viktigt att noga överväga strukturmodellens geometriska avgränsningar. Risk finns annars att felaktiga slutsatser dras. Ett exempel på detta illustreras i figur 4.3 nedan. Här postuleras ett rörbrott vid anslutningen mot reaktortanken. Missilskyddsskorna på röret fungerar i början av förloppet som upplag mot missilskydden. Men något senare glider skon ur skydden, vilket innebär att det uppstår helt nya upplagsvillkor för rörsystemet. Detta exempel visar på typiska oönskade effekter som, på grund av för grova modellantaganden, inte beaktats vid den ursprungliga dimensioneringen och därför resulterat i felaktiga konstruktionslösningar. I detta fall kan missilskon endast uppfylla sin funktion i

händelseförloppets inledning. Genom att analysera systemet med en hög detaljeringsgrad med avseende på geometri och material kan konsekvenserna av sådana felkonstruktioner förhindras redan på konstruktionsstadiet eller utvärderas i efterhand.

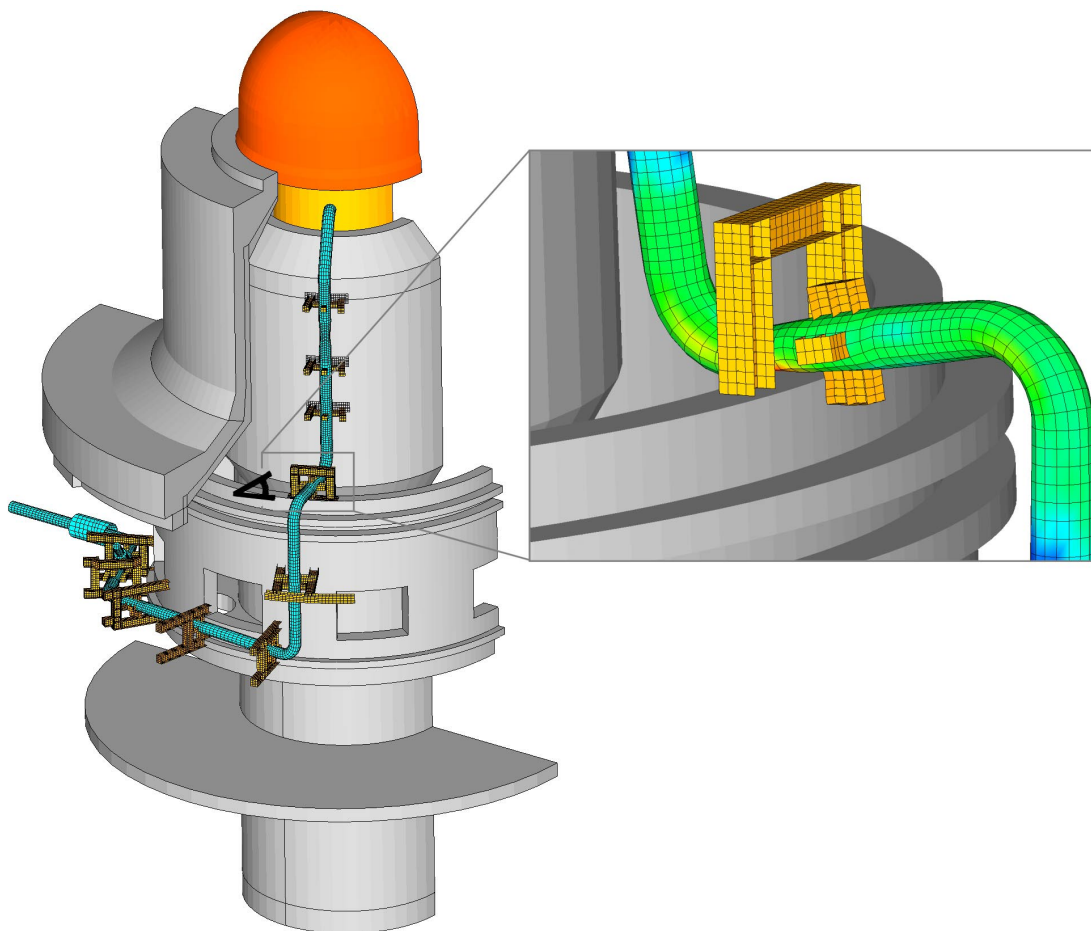


Figur 4.2 Snitt genom modell av reaktorinneslutning med reaktortank och anslutande system.

I analyser som innefattar rörsystem bör dessa beskrivas med skalelement. I för analysen mindre intressanta områden, med måttliga spänningsnivåer, kan rörkretsen nöjaktigt beskrivas med balkelement.

Ett viktigt argument för användning av skalelement vid beskrivning av rörsystem är att kunna beakta de ovaliseringseffekter som uppstår i röret vid stora deformationer och vid islag mot andra konstruktionsdelar. I figur 4.4 framgår detta tydligt. Ovaliseringseffekten resulterar i ett globalt sett vekare system som är svårt att beskriva med traditionella analytiska metoder, men som fångas in väl med användning av skalelementbeskrivning och FE-analys. Stora deformationer vid islag ger en minskad belastning på träffad struktur.

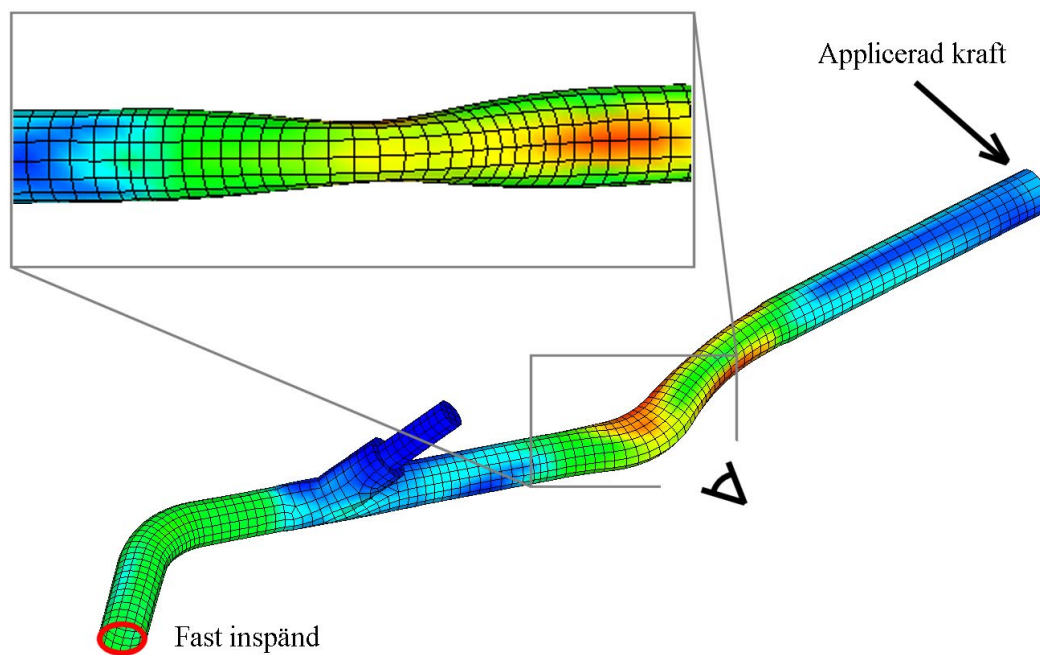
Missilskydd bör som regel definieras av skalelement, dels för att kunna beskriva kontaktvillkor mot rörkretsarna och dels för att dessa konstruktionsdelar ofta utsätts för stora plastiska töjningar, vilket beskrivs tydligast med skalelement.



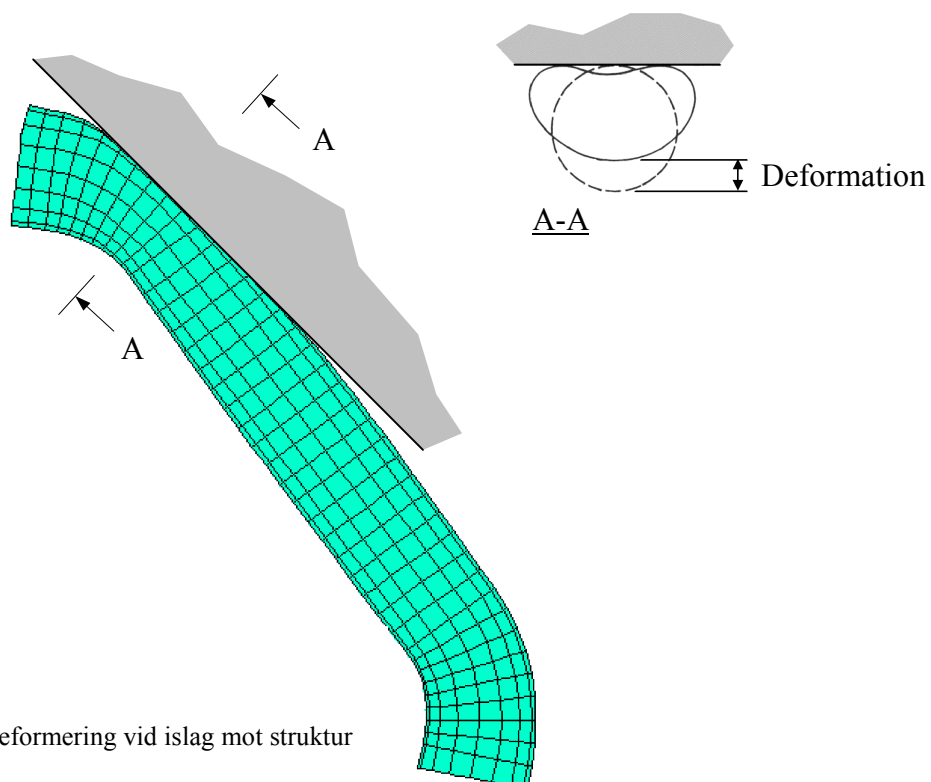
Figur 4.3 Exempel på förändring av upplagsvillkor under analysförloppet.

Reaktortanken (och andra stålkonstruktioner) beskrivs naturligtast med skalelement, medan grövre betongkonstruktioner oftast modelleras med solidelement. Bäst beskrivning av kontakt och de lokala effekter som erhålls vid islag mot betongkonstruktioner erhålls med hjälp av solidelement. Den i inneslutningsväggen ingjutna tätplåten kan med fördel beskrivas med skalelement. Moderna FE-koder möjliggör via kontaktformuleringar också en rationell hantering av samverkanseffekter mellan tätplåt och betongkonstruktion.

Detaljeringsgraden uttryckt i tätheten i finita elementnätet styrs av det grundläggande kravet att modellen med erforderlig noggrannhet ska kunna beskriva strukturens respons för den aktuella händelsen. Härvid måste vid dynamisk analys speciellt fokuseras på lastens frekvensinnehåll. Vidare måste vid utformningen av elementnätet speciell omsorg tas till de områden i strukturen där spänningskoncentrationer eller plastiska töjningsnivåer uppstår. Den övre gränsen för modellens storlek begränsas oftast av tillgänglig datorkapacitet.



a) Ovalisering vid stor deformation



b) Deformering vid islag mot struktur

Figur 4.4 Lokal deformation av rör.

4.3.3 Material

4.3.3.1 Allmänt

Missilhändelser karakteriseras av att vissa strukturdelar innehar kinetisk energi samt att islagsförlopp med icke-linjära materialbeteenden uppstår. Detta innebär att det är nödvändigt att använda beskrivningar av materialets egenskaper ända fram till brott. Missillasters monotona karaktär medför att reverserande egenskaper oftast inte behöver beaktas.

Detaljeringsgraden i materialmodelleringen bestäms utifrån vad som skall verifieras i analysen. Om det finns utrustning vars funktion eller integritet kan förmodas skadas om det träffas av missilen, är det i princip tillräckligt att beskriva dessa som helt stela ytor, och att ur analysresultatet endast kontrollera huruvida islag sker eller ej. Men om kravet däremot är att exempelvis kollaps av en betongpelare inte får inträffa, men att begränsade lokala skador kan accepteras, måste modellbeskrivningen göras mycket noggrannare. I detta fall måste pelaren beskrivas så att uppsprickningen av betongen och samverkan med armeringen kan hanteras.

Komplexiteten av de materialmodeller som används måste anpassas efter det syfte som analysen har. Detaljnivån styrs bl.a. av erfarenhetsbaserat ingenjörs-kunnande och känslighetsanalyser.

4.3.3.2 Stål

Vid materialmodellering av stål för tillämpning i missilanalyser kan det oftast vara tillräckligt att använda en klassisk von Mises modell med isotropiskt hårdnande. En fördel med denna materialformulering är att det i princip är tillräckligt att utnyttja materialdata från ett traditionellt dragprov för att kunna bestämma material-egenskaperna. En begränsning i denna konstitutiva materialbeskrivning är dock att töjningshastigheten inte finns med. Detta kan eventuellt behandlas i separata känslighetsanalyser.

4.3.3.3 Armerad betong

De senaste årtiondena har intensiv forskning kring olika aspekter på betong, armerad betong och samverkan mellan betong och armering pågått. En följd av detta är att de konstitutiva modellerna för betong har kunnat förbättras med avseende på både mekanisk påverkan och påverkan av yttre miljö.

Trots detta krävs ytterligare forskning kring materialets grundläggande egenskaper. Framförallt vad gäller beteendet vid fleraxiellt spänningstillstånd och vid dynamisk reverserande last.

Flera av de materialmodeller för betong som existerar idag fyller sitt syfte väl i de flesta situationer, men det finns ingen generellt vedertagen modell med vilken man kan beskriva materialets beteende för alla typer av problem. Lämplig materialmodell ska väljas utifrån den aktuella situationen och det beteende som ska studeras.

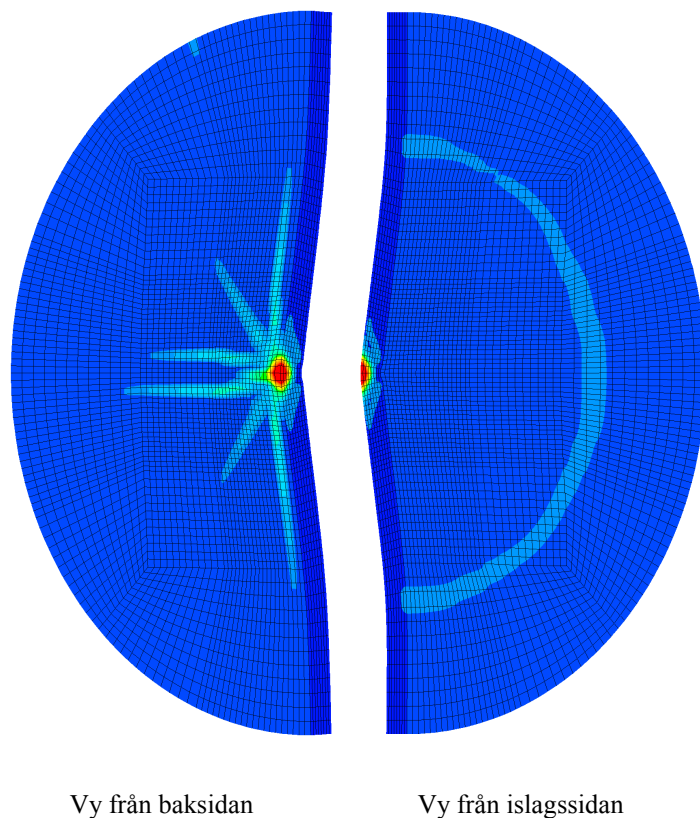
När ett material har tömt ut sina hållfasthetsresurser i det linjära området i en materialpunkt sker en omfördelning av spänningar till närliggande områden. För material där sprickbildning förekommer kan denna omfördelning modelleras med brottmekanik. Två inriktningar av brottmekaniken kan då urskiljas, nämligen linjär brottmekanik och icke-linjär brottmekanik.

Den linjära brottmekaniken bygger på antaganden om att materialet uppträder linjärelastiskt ända fram till brott. Dessa antaganden medför stora generaliseringar och är otillfredsställande för den typ av problem som behandlas här.

Att materialets draghållfasthet tillåts överskridas utgör en av de stora bristerna med att använda linjärelastisk brotteori för spröda material. För att förhindra detta kan icke-linjär brottmekanik användas. Uppsprickning av spröda material som betong, där zonen kring sprickspetsen består av ett område med mikrosprickor, framkallar bristningar vid påkänning. Dessa bristningar leder fram till lokala spänningskoncentrationer i ett plan, dvs små diskreta sprickor. Metoder som beskriver sprickbeteendet som jämnt fördelade mikrosprickor kan samtidigt beakta förmågan att överföra spänningar vid olika sprickvidder. Ordet ”spricka” används då inte i bemärkelsen diskret makrospricka, utan mer i en mening att beskriva en riktning och ett område där uppsprickning är påbörjad.

Materialet kan förutsättas elastiskt upp till den nivå då dragspänningskapaciteten uppnås. Efter att den initiella draghållfastheten en gång uppnåtts betraktas materialet i någon mening som uppsprucket i denna riktning, och förhållandet mellan (den minskande) dragspänningen och spricköppningen i denna riktning, bestäms då av ett nytt samband. Ytterligare töjningsökningar i materialområdet, efter initierad sprickbildning, utgörs enbart av spricktöjningar och därmed successivt minskad hållfasthetskapacitet i sprickzonen. Modellen kan innehålla brottenergin och initiell draghållfasthet som materialparametrar för att beskriva mjuknandesambandet, och därmed behandla uppsprickning som en materialrespons snarare än en geometrisk diskontinuitet.

Figur 4.5 visar en analys av en centrisk stötlast mot en cirkulär betongplatta, utförd i Thunell och Brommesson [26].



Figur 4.5 Stötlast mot betongplatta som spricker upp.

Vid analysen användes en icke-linjär betongmodell av den typ som diskuterats ovan. Figuren visar sprickmönstret på halva plattan, dels till vänster från baksidan, och dels till höger från islagssidan. Deformationen av betongplattan är kraftigt överdriven för att öka tydligheten.

Lokala effekter på betong, såsom exempelvis splittring, penetration och genomstansning, se figur 3.3, utgör komplicerade förlopp att beskriva med FE-teknik. Man kan emellertid beskriva flera av dessa effekter med hjälp av detaljerade modeller och kalibrering mot utförda försök. Här krävs emellertid mera forskning kring förståelse av de grundläggande samband som styr dessa förlopp.

4.3.4 Laster

4.3.4.1 Allmänt

Traditionellt har missilhändelser oftast hanterats genom att betrakta missilen och den påverkade konstruktionsdelen som två separata system. Härvid appliceras reaktionskrafterna, som framräknats från den separata analysen av missilen, mot de anslutande eller påverkade konstruktionsdelarna, varefter lasteffekterna beräknas.

Den största bristen med detta angreppssätt är att missilen respektive de påverkade konstruktionerna betraktas som två separata system, när de i själva verket beskriver ett samverkande dynamiskt system. Detta resulterar i att risk finns för att lastbeskrivningen mot den påverkade konstruktionen blir felaktig.

En annan stor brist har varit att hänsyn till materiella och geometriska olinjära effekter i missilen och övriga konstruktionsdelar oftast inte beaktats, alternativt beaktats med stöd av allt för grova antaganden.

I syfte att skapa en mer realistisk beskrivning av de lasteffekter som uppstår vid missilpåverkan, kan tredimensionella beräkningsmodeller genereras av missilen och omkringsliggande konstruktioner, inklusive byggnadskonstruktionerna, se figur 4.6.

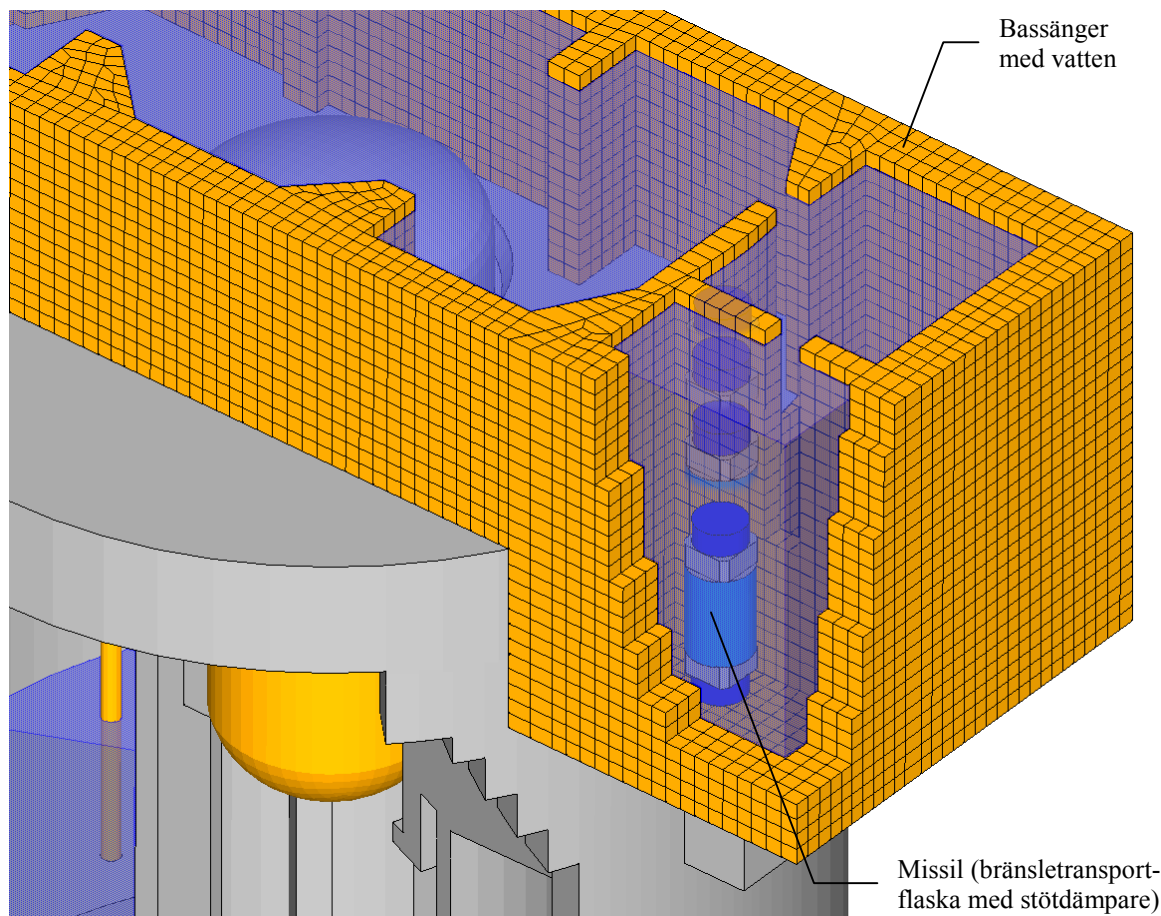
Därmed erhålles ett integrerat dynamiskt system, där samtliga relevanta strukturdelar ingår. Med användning av kontaktvillkor mellan ingående konstruktionsdelar och missil kan osäkerheter kring islagseffekterna reduceras och indatabeskrivningen i första hand fokuseras till beskrivning av själva missilen och dess beteende.

För att beskriva det initiella spänningstillståndet i ett system på ett så korrekt sätt som möjligt bör de laster som verkar vid normal drift appliceras. Laster som normalt verkar under drift kan vara egentygnd och termisk last. Vissa konstruktionsdelar, såsom exempelvis reaktorinneslutningen, består av spännarmerad betong. Spännkraften är även den en permanent last som påförs strukturen i form av ett initieellt spänningstillstånd.

För stötsituationer som karakteriseras av kinetisk energi behöver vanligtvis inga yttre laster definieras i FE-analysen, eftersom det fysikaliska tillståndet definieras av styvheter, massor, initialhastigheter etc. styr hur kropparna påverkar varandra. I vissa fall måste dock yttre laster definieras, exempelvis vid rörbrott, då även tidsberoende inre tryckförlopp måste beaktas, samt effekten av utströmmande medium från den ände där brottet inträffat. Även den strålkraft som uppstår från den motstående röränden måste ofta beaktas och eventuellt appliceras i form av en yttre last.

Ett rör med inre övertryck utgör ett styvare system än motsvarande rör utan inre övertryck. Ett för högt inre tryck ger alltså upphov till ett för styvt rör, samtidigt som det högre trycket medför en större last på röränden. Ett resonemang kring effekterna av

ett för högt (eller för lågt) tryck måste tas med inom ramen för de ingenjörsmässiga antagande som görs för analysen.

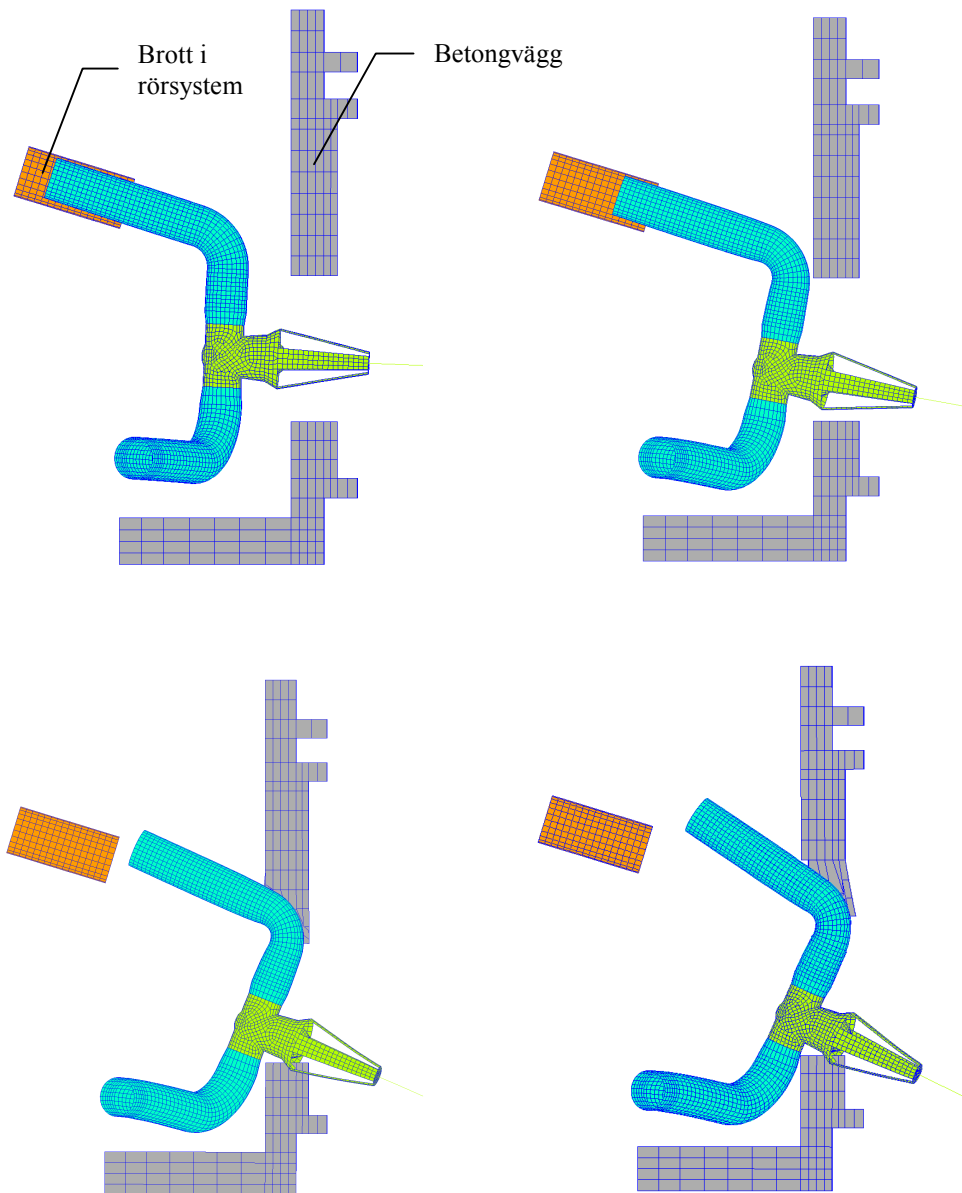


Figur 4.6 Missil (tappad bränsletransportflaska med stötdämpare) och byggnadsdelar (reaktor- och bränslebassäng) utgör ett integrerat system.

Av de olika missillaster som beskrivs i detta dokument är det de som uppstår till följd av rörbrott som kräver extra noggrant beaktande. Vid ett rörbrott är inte endast själva islagslasten intressant, utan även missilens beteende före och efter islaget. Rörbrottet uppstår vanligen i form av ett giljotinbrott, varvid en missil uppstår. Härvid är det av avgörande betydelse för analysens resultat att relevanta beskrivningar av lasttidsfunktionen i brottytan samt av den brustna rörkretsens geometri med sina kopplingar mot intilliggande strukturer används. Rörbrottshändelser karakteriseras även av att den träffade strukturen belastas efter islaget av en kvarvarande statisk last. Detta innebär att hela det förlopp som föregår och efterföljer själva islaget är viktigt att analysera. Figur 4.7 nedan illustrerar detta genom att visa inverkan av foderrörets styrning av rörmissilen fram till kontakt med väggkonstruktionen.

Efter islaget verkar fortvarigt en rörbrottskraft i röränden, vilket innebär att en viktig del av analysen är att faktiskt visa att ett kontrollerat tillstånd inställer sig och att inte missilen penetrerar igenom väggen.

En mer ingående beskrivning av de laster som måste beaktas vid rörbrottsanalyser ges i följande två avsnitt.



Figur 4.7 Beskrivning av rörmissil från brott till islag av betongvägg.

4.3.4.2 Rörbrottslaster

I händelse av ett giljotinbrott på en rörkrets uppstår till följd av den utströmmande fluiden en last som verkar på röränden. Det är viktigt att lasten till följd av jetkraften från den utströmmande fluiden appliceras så att lasten följer rörkretsens deformation, se figur 4.8b.

Flera olika uttryck används för benämning av de krafter och laster som kan uppstå till följd av ett rörbrott. Nedan följer en kortfattad beskrivning av dessa olika uttryck. Krafterna är illustrerade i figur 4.8a:

Rörbrottskraft (Pipe rupture force)

Allmän benämning för samtliga de krafter som uppstår till följd av rörbrottet.

Impulskraft (Blowdown force), F_i

Kraften som uppstår på grund av impulsen i den utströmmande fluiden.

Vågkraft (Waveforce), F_v

Kraft som uppstår på grund av tryckvågor i rörsystemet.

Total kraft på trasigt rör (Jet thrust force)

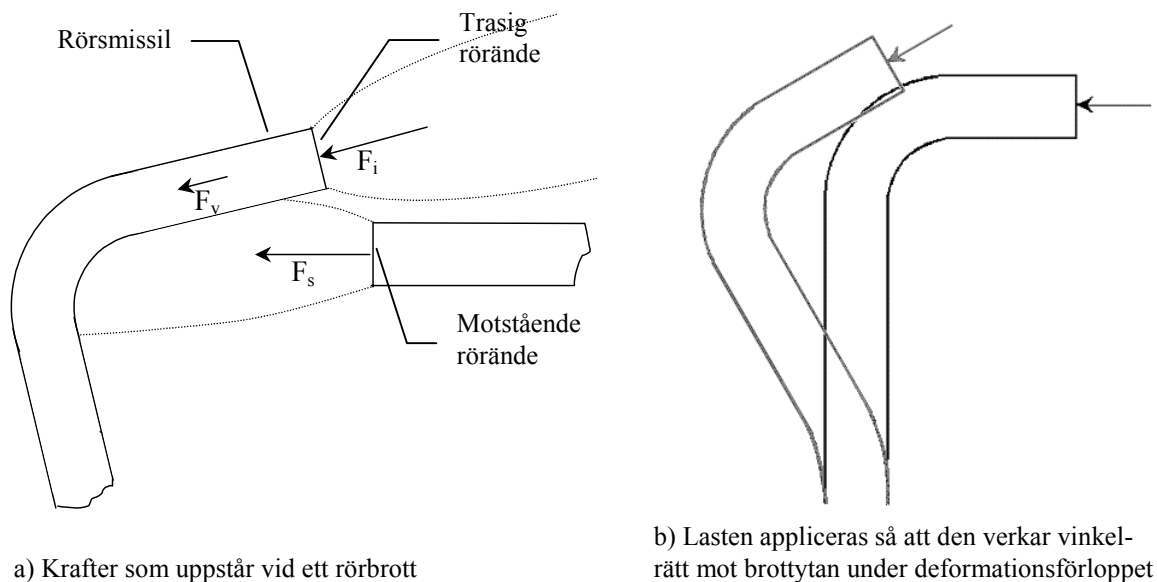
Summan av de krafter som verkar på den trasiga röränden. ($F_i + F_v$).

Jetstrålkraft (Jet impingement force), F_s

Kraft till följd av den utströmmande jetstrålen ur den motstående röränden. Är lika stor som ovanstående impulskraft.

Jetstrållast (Jet impingement load)

Last som uppstår då jetstrålen, från den trasiga eller motstående röränden, träffar ett objekt.



Figur 4.8 Illustration av krafter som uppstår vid ett rörbrott.

Som tidigare nämnts, i kapitel 3, är det vanligt att rörbrottslasterna vid en förenklad analysmetodik approximeras med en över tiden konstant kraft. Den kraften brukar beräknas enligt följande,

$$F = C_T \cdot P \cdot A \quad (4.1)$$

C_T = koefficient för anslagskraft (thrust coefficient)

P = systemtryck före rörbrott

A = rörbrottsarea

Koefficienten C_T kan bestämmas till exempel enligt SRP [3] 3.6.2, som anger en konservativ, mycket förenklad metod, eller enligt ANSI/ANS-58.2-1988 [4], som anger en metod där hänsyn kan tagas till bland annat strömningsförluster och areaförträngningar.

Vid mer avancerade analyser är det ofta nödvändigt att ta hänsyn till rörbrottslasternas variation över tiden. I ANSI/ANS-58.2-1988 [4] anges en konservativ, förenklad metod. För att minska konservatismen i missilanalysen, och för att beskriva händelseförloppet

så verklighetstroget som möjligt, kan en noggrann bestämning av rörbrottslastens storlek och variation över tiden utföras med hjälp av fluiddynamiska beräkningsprogram. Härvid ska hänsyn tagas till de kombinerade effekterna av samtliga de laster som anges ovan, dvs F_i , F_v , och F_s .

Vidare ska, enligt SRP [3] 3.6.2, tidsvariationen relateras till tryck, entalpi och volym för fluiden samt systemets förmåga att förse brottområdet med ett flöde av högenergi-strömning under en signifikant tidsperiod. Den transienta funktionens form kan modifieras genom att beakta brottytans och systemflödets tillstånd, friktionsförluster i rörledningarna, flödets riktningsändringar samt tillämpning av flödesbegränsande anordningar. Studie av brottöppningstiden kan även utföras, vilket påverkar påförd last.

De idag praktiskt använda beräkningsprogrammen för bestämning av rörbrottslastens storlek och tidsvariation tar ej hänsyn till samverkan mellan fluid och struktur (rörssystem). Lovande analyser har dock under senare tid utförts med explicit FE-metodik och adaptiv teknik för generering av elementnät, där lösning av problem av typen gas-struktur interaktion vid snabba dynamiska förlopp har utförts.

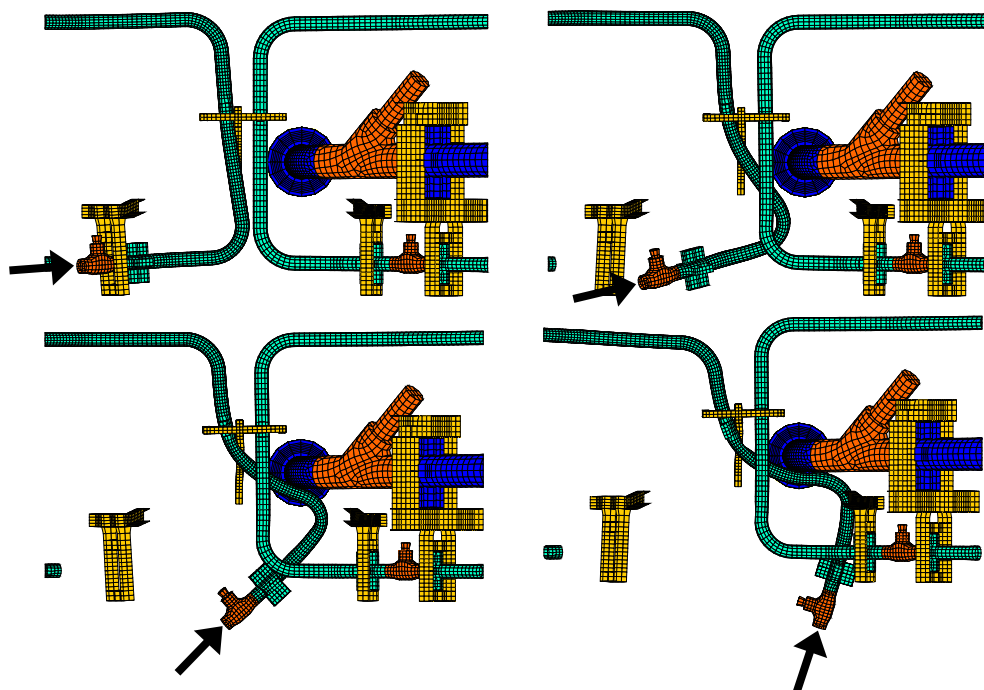
För att få trovärdiga, och icke onödigt konservativa beräkningsresultat, är det viktigt att rörbrottseffekterna som verkar mot rörbrottsmissilen beskrivs så korrekt som möjligt, både till storlek och tidsvariation. Detta är speciellt viktigt när avståndet till uppbromsande byggnadsstruktur är stort, varvid missilen kan bygga upp stor kinetisk energi som ger upphov till en stor stötkraft mot den träffade strukturen. Vidare är det viktigt att korrekt bestämma storleken på den med längre varaktighet verkande impulslasten, som bestämmer vilken "restbärförmåga" träffad struktur måste kunna uppvisa.

4.3.4.3 Metod

Rörbrottsanalyser genomförs under beaktande av tidsförlopp i enlighet med referenser som beskriver hur lasten i brottytan på den fria röränden (hos rörbrottsmissilen) utvecklas som funktion av tiden. Härvid utnyttjas anläggningsspecifikt framtagna tidshistorier som baseras på erkända metoder och programvaror för beräkning av lasten i brottytan, alternativt konservativt framtagna tidshistorier enligt principer för beräkning av rörbrottslaster uttryckta i ANSI/ANS-58.2-1988 [4].

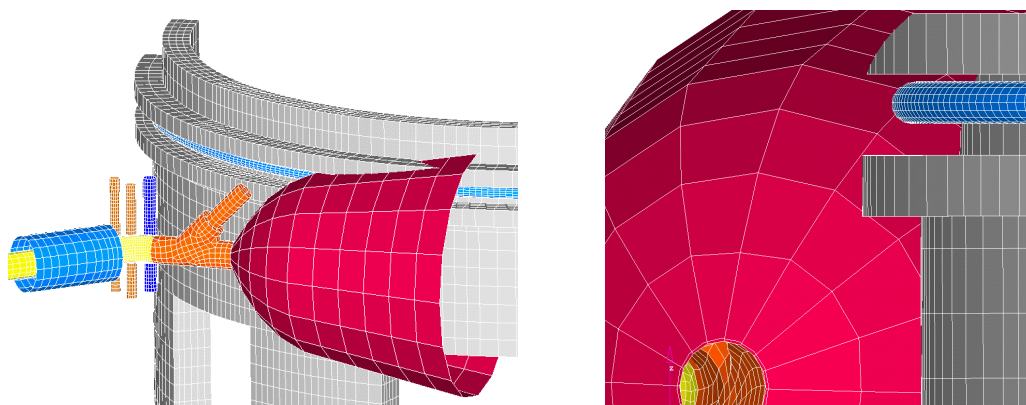
Rörbrottet simuleras i analysen genom att ett inre övertryck påförs i röret, samtidigt som randvillkoren i brottsnittet frigörs momentant. På grund av det inre övertrycket uppstår därvid en resulterande kraft, impulskraften, på den projicerade brottytan. Dessutom appliceras krafter i rörets riktning, motsvarande de vågkrafter som uppstår i rörkretsen. Figur 4.9 visar resultatet av dessa drivande krafter på en brusten rörkrets.

Jetstrålen från brottytan och från den motstående röränden förorsakar en last, jetstrållast, på de objekt som strålarna träffar. Jetstrålskraften är den kraft som verkar i brottytan. Då jetstrålen träffar ett objekt uppstår en jetstrållast mot objektets ytor, som beräknas med hänsyn tagen till avståndet från brottytan och utbredning av strålen, se figur 4.10.



Figur 4.9 Effekt av rörbrottskrafter på brusten rörkrets.

Jetstrållasten på grund av strålkraften från den motstående brustna rörkretsen ska appliceras på det studerade röret då detta deformerats så mycket att jetkonan träffar röret. Erfarenheten är dock att bidraget från denna last i de flesta fall är relativt liten. Detta beror på att det krävs en relativt stor deformation av röret för att den skall ha möjlighet att utsättas för påverkan. Samtidigt avtar lasten också längre från centrum av jetstrålen, vilket gör att lasterna oftast är små i jämförelse med övriga laster som verkar på det brustna röret.



Figur 4.10 Utbredning av jetstråle (den röda konen).

4.3.5 Randvillkor

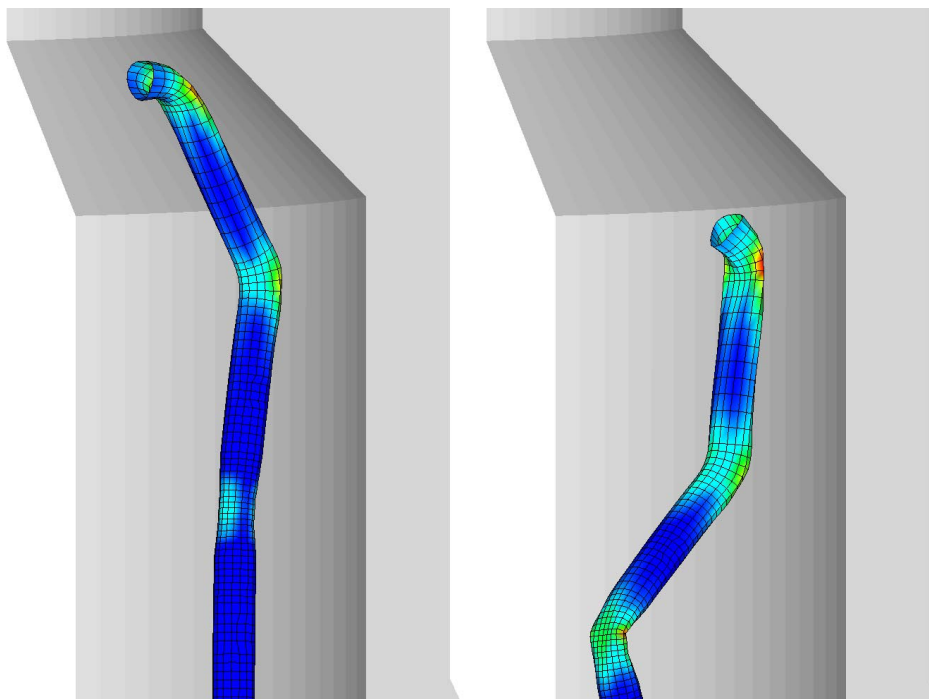
Det är av stor betydelse för resultatets trovärdighet att modellens randvillkor är relevant beskrivna. Vid exempelvis rörbrottsanalyser har det funnits viktigt att beskriva tillräckligt stor del av den brustna rörkretsen för att uppnå en tillförlitlig beskrivning av deformationsförloppet. Ofta krävs det att röret modelleras från brottstället ända fram till genomföringskonstruktionen eller reaktortankstutsen, eller till någon annan mycket styv

infästningssektion ("terminal end") där fast inspänning kan antas råda. Missilskyddsanslutningar mot rörkretsen kan i detta sammanhang inte anses motivera fast inspänning, se avsnitt 4.3.2.

4.3.6 Kontaktvillkor

Kontaktformuleringar mellan strukturdelar utgör en väsentlig del av en missilanalys. Kontakt kan formuleras på olika sätt, och det är viktigt att det finns en god förståelse för de funktioner som används.

Då man ansätter friktion mellan strukturdelar bör effekterna av denna studeras noggrant. Det är inte alltid självklart om ett högt eller lågt värde på friktionskoefficienten ger mest kritisk respons. Kontaktvillkor kan beskrivas mellan missil och islagen konstruktionsdel, men även mellan exempelvis rörkretsar och missilskydd. Figur 4.11 nedan illustrerar de skillnader som kan uppkomma vid ansättande av olika värden på friktionskoefficienten, i detta fall mellan rörkrets och vägg. Till vänster visas resultat för ett fall då ett högt värde på friktionskoefficienten ansätts, respektive till höger då friktionskoefficienten sätts till noll. I det senare fallet (högra bilden) uppstår ett instabilitetsproblem, medan kretsen hamnar i ett jämviktsläge då ett högt värde på friktionen användes (vänstra bilden).



Figur 4.11 Inverkan på resultatet vid användande av olika värden på friktionskoefficienten i kontaktytan mellan rörbrottsmissil och struktur.

Precis som i fallet med randvillkor bör kontaktdefinitionerna i en analys undersökas och testas noggrant med hjälp av parameterstudier.

4.3.7 Känslighetsanalyser

Eftersom FE-tekniken är en numerisk metod för att lösa de differentialekvationer som beskriver de fysikaliska sambanden för ett givet problem, införs ett numeriskt fel i analysen till följd av den diskretisering av de ingående kropparna som görs. En viktig

känslighetsanalys är därför att verifiera att felet till följd av diskretiseringen är acceptabelt litet. Detta kan göras på flera olika sätt. Ett tänkbart förfarande kan vara att göra en förenklad FE-modell av den analyserade strukturen med samma storlek på elementindelningen som ämnas användas i den slutliga modellen. Därefter beskrivs den förenklade modellen med en finare elementindelning och en jämförelse kan därefter göras för att verifiera att skillnaden i resultaten är acceptabla.

För att kunna klarlägga andra osäkerheter, såsom geometriska förenklingar, randvillkor, materialbeteende och kontaktformuleringar måste oftast ytterligare känslighetsanalyser utföras.

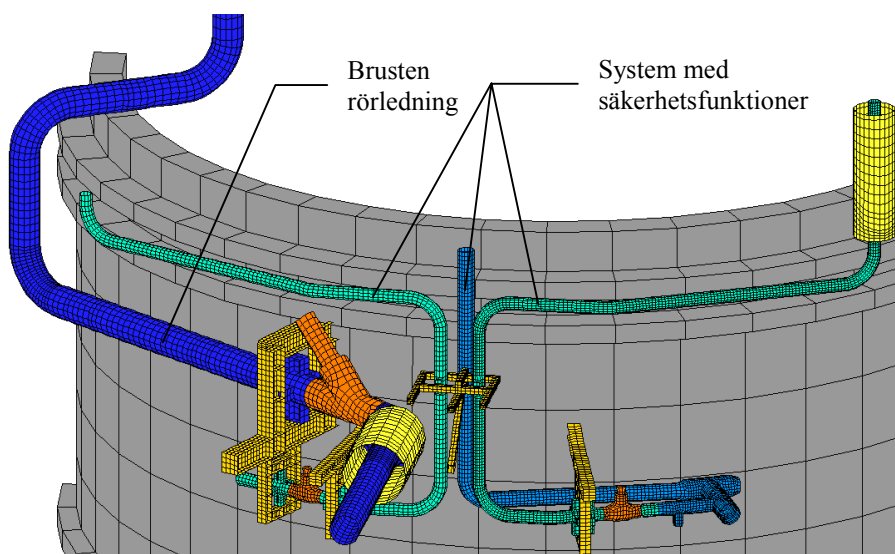
Osäkerheter i antaganden vid materialmodellering som kan behöva utvärderas hänförs framför allt till mass- och styvhetsegenskaper i de ingående kropparna. Som ett exempel kan nämnas att då en missil träffar en omkringliggande konstruktionsdel är det som regel konservativt för den träffade konstruktionsdelen, att utnyttja höga värden på sträckgräns och brottgräns för missilen. För missilen i sig kan detta antagande dock inte vara konservativt. Uttrycket konservativt avser i detta sammanhang värst lasteffekt för träffad konstruktionsdel. Ett antagande som är gynnsamt för en konstruktionsdel kan alltså vara ogynnsamt för en annan.

4.4 Säkerhetsvärdering

En stor fördel vid användning av FE-tekniken är att missilen och de omkringliggande strukturerna kan beskrivas i samma modell, se figur 4.12. Detta innebär att interaktion mellan missil och omkringliggande strukturer kan hanteras på ett vederhäftigt sätt. De strukturdelar, system och komponenter som upprätthåller säkerhetsfunktioner som måste fungera i samband med den aktuella händelsen, kan med fördel beskrivas i samma modell. Detta möjliggör en relativt enkel verifiering av att säkerhetsfunktionerna är uppfyllda.

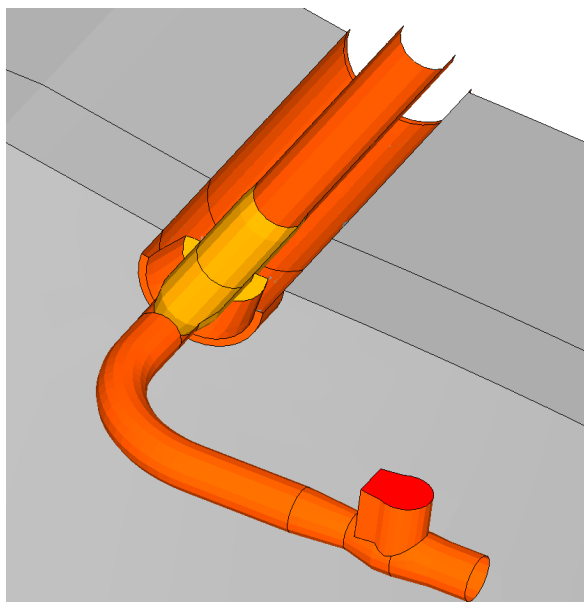
Resultatet av analysen ger en god beskrivning av missilens deformations- och islagsförlopp. Vidare ska resultatet utvisa huruvida ställda krav på funktioner och integritet hos byggnader, system och komponenter kan sägas vara uppfyllda vid den aktuella händelsen. Detta åskådliggörs med några exempel här nedan.

Genomföringskonstruktioner utgör komplicerade konstruktionsdelar för vilket mycket stränga hållfasthets- och täthetsvillkor gäller. Dessa konstruktionsdelar har ofta en komplicerad geometri vad gäller konstruktionsdetaljer vid anslutningarna mot systemrör, tätplåt och betongkonstruktioner. På grund av genomföringskonstruktionernas viktiga säkerhetsfunktion ställs speciella krav vid utvärdering av spänningstillstånden i dessa. Därför måste också kraven på modelleringsnoggrannhet vara högt ställda.



Figur 4.12 Strukturmodell av analyserad brusten rörledning inklusive närliggande system vars säkerhetsfunktioner måste upprätthållas.

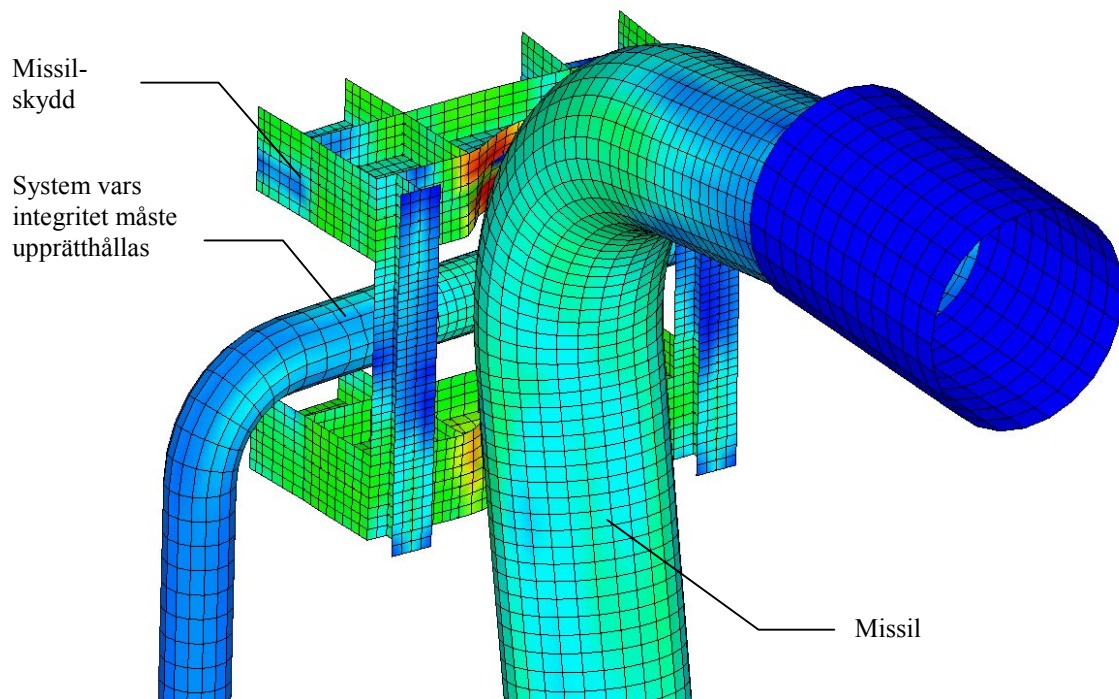
En detaljerad FE-modell av genomföringsområdet kan vara av mycket stort värde vid utvärdering av om acceptanskriterierna är uppfyllda i händelse av rörbrott, se figur 4.13. Exempelvis kan man med hjälp av FE-analys få detaljerad information om spänningstillståndet i både systemrör och genomföringskonstruktion. Med en väl genomtänkt modellbeskrivning kan man få fram spänningsresultat i svåranalyserade områden som exempelvis vid anslutningar mot tätplåt och betongstruktur.



Figur 4.13 Modell av genomföringskonstruktion.

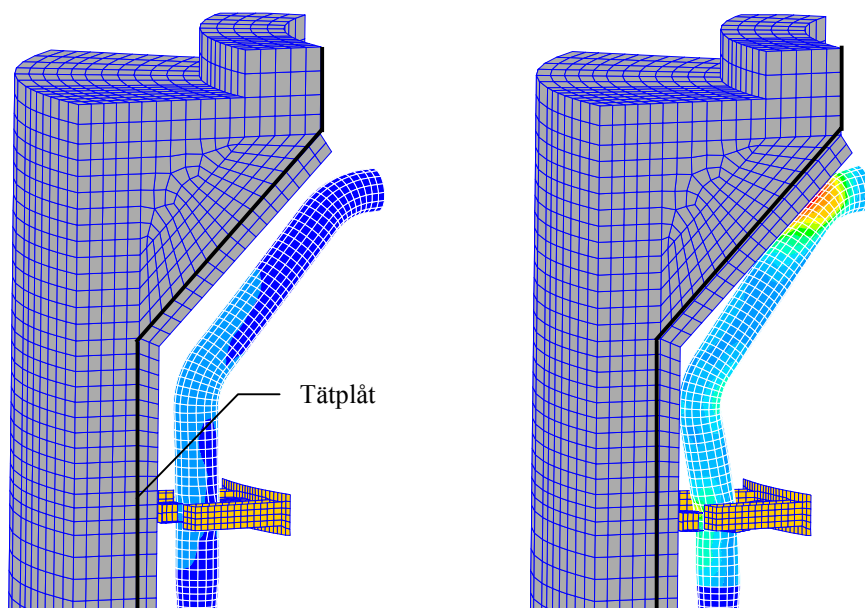
Ett krav som kan tänkas behöva verifieras är att en missil inte skadar ett annat system så att detta inte kan upprätthålla erforderlig funktion eller integritet vid den analyserade händelsen. Detta system kan då med fördel infogas i FE-modellen. Resultatet av en rörbrottsanalys kan då verifiera att missilens beteende inte skadar systemet på ett

oacceptabelt sätt. I figur 4.14 visas ett exempel av hur integriteten hos ett närliggande system kan visas upprätthållas i händelse av rörbrott.



Figur 4.14 Säkerställd integritet av närliggande system.

I ett annat exempel, se figur 4.15, studeras en inneslutningskonstruktion för vilken täthetsfunktionen måste visas upprätthållas i händelse av rörbrott. Ett krav är härvid att spänningen i tätplåten inte får överskrida sträckgränsen. I detta fall måste olinjära materialdefinitioner av betongen och tätplåten i inneslutningsväggen användas. En kontaktformulering införs mellan inneslutningsväggen och rörmissilen.

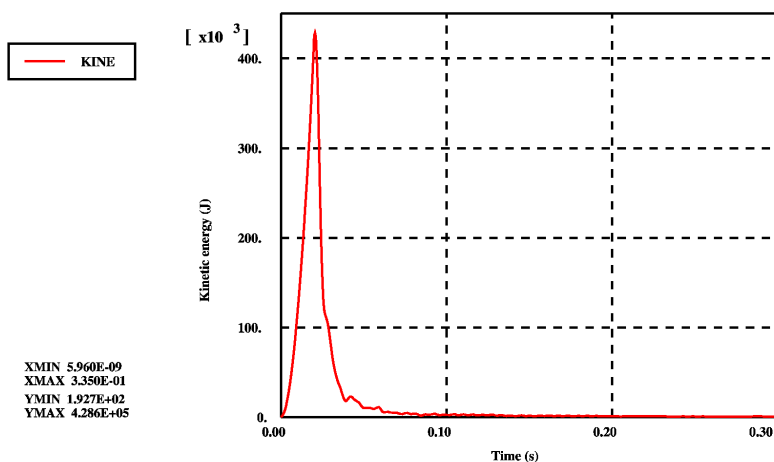


Figur 4.15 Deformation av rör och verifiering av tätplåtens integritet.

Röret slår i, vilket medför att spänningar i väggen och tätplåten uppstår. Verifieringen görs därefter genom att kontrollera spänningsnivåerna i tätplåten mot ställda acceptanskriterier.

För att kunna verifiera att säkerhetsfunktionerna är uppfyllda under händelseförloppet måste man även säkerställa att missilen fångas upp. Det måste alltså visas att en okontrollerbar missil inte uppstår och att den kinetiska energin i systemet klingar av.

Figur 4.16 visar hur den kinetiska energin för ett system typiskt utvecklas över tiden under händelseförloppet. Tidshistorien är representativ för ett system där en missil bildas för att fångas upp strax därefter. Redovisning av den kinetiska energin som funktion av tiden är ett utmärkt sätt att verifiera att systemet har kommit i ett stabilt jämviktsläge.



Figur 4.16 Rörelseenergi som funktion av tid.

4.5 Moderna analysmetoders möjligheter och begränsningar

4.5.1 Begränsningar i traditionell beräkningsmetodik

I avsnitt 3.4 redovisas traditionella beräkningsmetoders tillämplighet för hantering av missilgenererade lasteffekter. Bland de viktigaste begränsningarna bör speciellt nämnas de allt för grova modellbeskrivningar av både missil och träffad struktur som måste göras för att metoderna ska kunna tillämpas, samt svårigheten att beskriva själva islagsförloppet. De traditionella metoderna baseras bland annat på erfarenheter från ballistiska experiment utförda inom militärindustrin och på kompletterande försök inom kärnkraftsindustrin, i syfte att ta fram generella formler som är tänkta att kunna tillämpas för de flesta typer av missillaster som kan uppstå. I själva verket är varje enskild missilhändelse unik till sin karaktär, både vad gäller de förutsättningar som styr missilens respektive den träffade strukturens beteende.

För att överhuvudtaget kunna hantera samtliga ingående analyssteg och välja relevanta indataparametrar med sitt stora spridningsomfång, är risken stor att man adderar allt för många konservativa antaganden på varandra. Detta kan resultera i en minskad total anläggningssäkerhet eftersom installationer i form av onödiga förankringar och missilskydd försvårar kontroll och underhåll av anläggningens säkerhetssystem. Vidare

kan felaktigt placerade rörbrottsförankringar och skydd medföra ett oönskat beteende hos rörbrottsmissilen. En annan stor brist med den traditionella analystekniken är att den oftast medför att mycket persontid måste förbrukas i form av tidskrävande handberäkningar.

4.5.2 Fördelar med användning av moderna analysmetoder

De flesta av de brister som identifierats vid användning av de traditionella metoderna kan elimineras genom att utnyttja moderna analysmetoder baserade på FE-teknik. Framförallt ska då nämnas möjligheterna att göra erforderligt detaljerade beskrivningar av geometri, kontakt och material. Genom att skapa modeller där samtliga för analysen styrande förutsättningar ingår, erhålls ett tydligt helhetsperspektiv av händelseförloppet, allt från missilens beteende och islagsförloppet till beräkning av lasteffekterna. Analysresultatet utgör sedan ett utmärkt underlag för verifiering av att ställda acceptanskriterier är uppfyllda.

Sammanfattningsvis kan klarläggas att de senaste årens utveckling av finita elementtekniken öppnar upp för nya möjligheter att simulera missilgenererade händelseförlopp. De viktigaste fördelarna jämfört med äldre teknik sammanfattas här nedan. De nya analysmetoderna möjliggör en

- tydligare och bättre beskrivning av missilers beteende.
- bättre beskrivning av interaktionen mellan missil och träffad struktur.
- hög kvalitet i den hållfasthetstekniska verifieringen av ställda acceptanskriterier.
- rationell teknik för optimering av säkerhetshöjande åtgärder.
- effektivare planering av framtida underhållsbehov.
- ökad allmän förståelse för missilers beteende samt de effekter dessa förorsakar.

4.5.3 Moderna analysmetoders begränsningar

Som nämnts i avsnitt 4.1 är finit elementteknik en mycket kunskapsintensiv och krävande teknik. Användaren måste därför vara väl insatt i såväl den grundläggande teorin som de specifika tillämpningarna som används i varje enskilt fall. Felaktig användning av en metod leder otvivelaktigt till icke tillförlitliga eller direkt felaktiga resultat. Härvid avses i första hand risk för felaktiga antaganden i struktur- och materialmodeller, feltolkning av analysresultat och okunskap om programvarornas begränsningar.

Det krävs vidare mera forskning kring inverkan av vissa indataparametrar till analyserna. Exempelvis finns det fortfarande behov av mer kunskap kring händelseförloppet då ett giljotinbrott uppstår i ett högenergisystem. Idag är man fortfarande oftast hänvisad till konservativa antaganden enligt metoder beskrivna i ANSI/ANS-58.2-1988 [4]. Vidare finns det en del osäkerheter kring materialbeteende vid snabba dynamiska förlopp. Betongmaterialmodellerna kan utvecklas vidare, bland annat för att bättre kunna hantera lokal krossning vid islag och uppsprickningsförlopp i tre dimensioner.

Utöver vad som nämnts här ovan bör även mer insatser göras för att verifiera analysmetoderna mot utförda experiment, samt att generellt vidareutveckla och effektivisera tekniken.

4.6 Förslag till fördjupade studier

4.6.1 Allmänt

Som framgår av redovisningen här ovan öppnar finita elementmetoden för helt nya möjligheter att analysera extrema händelser av olyckskaraktär. Händelseförlopp som medför att missiler uppstår kan simuleras noggrant, varvid tydliga analysresultat erhålls som kan tjäna som underlag för säkerhetshöjande åtgärder och som hållfasthetstekniska verifieringar. Som nämnts i avsnitt 4.5 finns det emellertid fortfarande en del begränsande faktorer i tekniken som hämmar en bredare tillämpning. I detta avsnitt ges därför förslag till fördjupade studier i syfte att verifiera analysmetoderna, vidareutveckla och förbättra dessa och därigenom öka teknikens tillämpning.

4.6.2 Några exempel på möjliga vidareutvecklingsprojekt

4.6.2.1 Jämförelse av datorsimulerad missilanalys gentemot experiment

Stötförloppet då en missil träffar en struktur är av mycket komplicerad natur. Missilen har ofta en stor rörelseenergi vid islaget som kan resultera i stora skador på både missil och struktur. Flera FE-programvaror har idag möjlighet att hantera islagsförlopp som medför att plastiska skador uppstår. Det finns emellertid fortfarande en avsaknad av jämförande studier mellan datorsimuleringar och utförda försök på verkliga konstruktioner. Sådana studier hade medfört att man erhållit dokumenterade resultat för bedömning av metodens tillförlitlighet och eventuella begränsningar vad gäller materialrutiner etc.

Utifrån sådana studier kan dessutom en bättre förståelse erhållas av hur olika modelleringsalternativ påverkar analysresultaten. Som ett resultat av denna studie skulle acceptabla riktlinjer för metodens tillämpning kunna utformas.

4.6.2.2 Parameterstudier av strukturresponser

Missiler brukar traditionellt kategoriseras som ”hårda” respektive ”mjuka”. Genom att med hjälp av datorsimuleringar utföra parameterstudier av strukturresponser vid ”hårda” respektive ”mjuka” missiler mot styva respektive veka väggar skulle värdefull information om islagseffekterna kunna erhållas. Sådana studier skulle genomföras under antagande om olika geometriska utformningar, hastigheter och materialsammansättningar hos missiler, samt under beaktande av olika geometriska förutsättningarna för den träffade väggkonstruktionen.

4.6.2.3 Parameterstudier av rörbrott på typiska rörsystem innanför inneslutningen

Utgående ifrån geometriska och materiella förutsättningar på typiska rörsystem i reaktorinneslutningen skulle kritiska parametrar kunna identifieras med avseende på inneslutningens täthetsfunktion. Vidare kan studier genomföras i syfte att utreda effekterna av att ett rör slår i ett annat rör, och sätta upp begränsningarna för under vilka förutsättningar (dimensioner, avstånd, materialvillkor, etc.) som den gamla tesen att ”mindre rör inte slår ut större rör” gäller.

4.6.2.4 Problemställningar avseende modellering av armerad betong

Armerad betong är ett komplicerat material att konstitutivt beskriva för användning vid datorsimuleringar. Här föreslås studier i syfte att identifiera problemställningar som kan vara aktuella i kärntekniska anläggningar. Fokus bör vara på beteendet hos armerad betong vid extrema lasteffekter till följd av missilpåverkan.

4.6.2.5 Studier av genomföringsområden vid extrema belastningar

Genomföringskonstruktionerna utgör komplicerade delar av inneslutningsfunktionen. Dessa delar är ständigt föremål för omfattande diskussioner och utredningar. Med stöd av detaljerade finita elementmodeller av typiska genomföringskonstruktioner, inklusive anslutande betongkonstruktionsdelar med tätplåt, samt rördelarna mellan skalventilerna, skulle många frågeställningar kunna klaras ut. Genom att utföra analyser för vanliga driftfall men även för extrema händelser (exempelvis rörbrott vid skalventilen) kan responsen studeras ända fram till kollaps. På detta sätt kan ökad förståelse för dessa konstruktioners beteende uppnås samt kritiska konstruktionsdetaljer med avseende på täthet och bärförmåga identifieras.

5. Referenser

- [1] Title 10 of the US Code of Federal Regulations, Appendix A to Part 50, *General Design Criteria for Nuclear Power Plants*.
- [2] Statens kärnkraftsinspektion, *Statens kärnkraftsinspektions föreskrifter om säkerhet i vissa kärntekniska anläggningar samt Allmänna råd om tillämpningen av Statens kärnkraftinspektions föreskrifter enligt ovan*, Statens kärnkraftsinspektions författningssamling SKIFS 1998:1, Stockholm 1998.
- [3] U.S. Atomic Energy Commission, *Standard Review Plan*, NUREG-0800, Office of Nuclear Reactor Regulation, Washington.
- [4] American Nuclear Society, *Design Basis for Protection of Light Water Nuclear Power Plants Against the Effects of Postulated Pipe Rupture*, ANSI/ANS-58.2-1988, American Nuclear Society, Illinois 1988.
- [5] Scanscot Technology AB, *Dimensioneringsregler för byggnader DRB:1998 (Oskarshamn 1/2/3, Barsebäck 1/2 samt Forsmark 3)*, Teknisk rapport 98118/TR-01, Lund 1998.
- [6] Boverket, *Boverkets handbok om betongkonstruktioner BBK 94*, Karlskrona 1994.
- [7] European Committee for Standardization, *Eurocode 1, Basis of design and actions on structures-Part 1: Basis of design*, ENV 1991-1, Bryssel 1994.
- [8] Svensk författningssamling, *Plan- och bygglagen*, SFS 1987:10.
- [9] Bangash M. Y. H., *Impact and explosion*, Blackwell Scientific Publications, 1993.
- [10] Hellström, K.-G., *Jämförelse mellan några olika formler för beräkning av projektilers inträngning i betong*, FortF rapport C6:86, Stockholm 1986.
- [11] Kennedy R. P., *A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects*, Paper presented at the International Seminar on Extreme Load Conditions and Limit Analysis Procedures for Structural Reactor Safeguards and Containment Structures, Berlin, 8-11 september 1975.
- [12] UKEA, *Guidelines for the Design of Concrete Structures Subjected to Impact*, United Kingdom Atomic Energy Authority, Warrington, 1988.
- [13] Goldsmith, W., *Impact*, Edward Arnold (Publishers) Ltd., 1960.
- [14] ASCE, *Civil Engineering and Nuclear Power, Vol. V: Report of the ASCE Committee on Impactive and Impulsive Loads*, American Society of Civil Engineers, Knoxville Tennessee, September 15-17 1980.
- [15] Barr P. et al, *Experimental studies of the impact resistance of steel faced concrete composites*, International conference on structural mechanics in reactor technology, 1983.

- [16] ASCE, *Structural Engineering in Nuclear Facilities, Update on Impact Effects in Nuclear Plants Part 1, 2 and 3*, ASCE Committee on Impactive and Impulsive Loads, American Society of Civil Engineers, Raleigh North Carolina, September 10-12 1984.
- [17] Paz M., *Structural dynamics. Theory and computation*, Van Nostrand Reinhold, 1991.
- [18] Biggs J. M., *Introduction to Structural Dynamics*, McGraw-Hill, 1964.
- [19] Kar, Anil K., *Local effects of tornado-generated missiles*, Journal of Structural Division Vol. 104 No ST5, American Society of Civil Engineers, 1978.
- [20] Sinclair, A.C.E, Fullard, K., Baker, D., *The impact resistance of concrete slabs under heavy dropped loads*, International conference on structural mechanics in reactor technology, Lausanne, 17-21 augusti 1987.
- [21] Boverket, *Boverkets handbok Svängningar, deformationspåverkan och olyckslast*, Karlskrona 1994.
- [22] European Committee for Standardization, *Eurocode 1, Basis of design and actions on structures-Part 2-7: Actions on structures-Accidental actions due to impact and explosions* samt tillhörande *Background document*, ENV 1991-2-7:1998 respektive CEN/TC250/SC1, Bryssel 1998.
- [23] von Essen, W./Sundqvist, H., *Dimensionering för påkörning och andra dynamiska olyckslaster*, Väg- och vattenbyggaren nr 10, 1975.
- [24] Boverket, *Boverkets konstruktionsregler BKR*, Karlskrona 1998.
- [25] EPRI, *Nonlinear dynamic analysis of pipe whip tests*, Electrical Power Research Institute, 1986.
- [26] Thunell och Brommesson, *Missilverkan mot betongkonstruktion*, Lunds tekniska högskola, Lund, 1999.