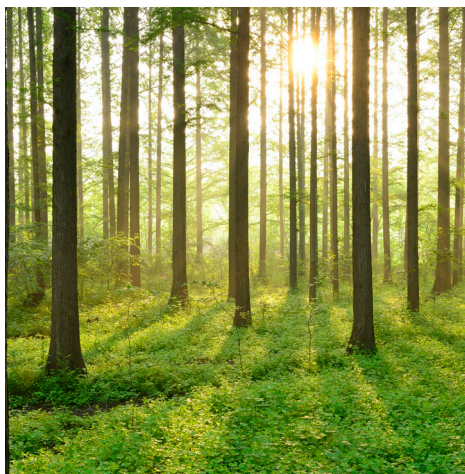


GRANSKNING AV BERÄKNINGAR I BETONGKONSTRUKTIONER

RAPPORT 2016:259



Granskning av beräkningar i betongkonstruktioner

Vägledning för granskning av datorberäkningar av
mekanik och transportprocesser

**TOMAS EKSTRÖM, PER-JOHAN GUSTAFSSON, MIKAEL HALLGREN, MANOUCHEHR
HASSANZADEH, RICHARD MALM, LARS-OLOF NILSSON, SVEN THELANDERSSON**

ISBN 978-91-7673-259-5 | © 2016 ENERGIFORSK

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Syftet med denna rapport är att ge vägledning till både beställning och granskning av avancerade datorbaserade beräkningar. De beräkningar som avses är beräkningar baserade på finita elementmetoden eller motsvarande för analys av mekanik och transportmekanismer i anläggningskonstruktioner av betong i vattenkraftkonstruktioner. Begreppet mekanik inkluderar här spänningar, deformationer, hållfasthet, brott och sprickbildning. Begreppet transportmekanismer inkluderar mass- och värmefflöde i betongen.

Projektet har utförts av Tomas Ekström, Per-Johan Gustafsson, Mikael Hallgren, Manouchehr Hassanzadeh, Richard Malm, Lars-Olof Nilsson, Sven Thelandersson inom Energiforsks betongtekniska program vattenkraft.

Sammanfattning

Vattenkraftens konstruktioner befinner sig i en miljö där belastningar orsakade av så väl mekaniska som fysikaliska och kemiska fenomen gör sig gällande och bör beaktas vid dimensionering och tillstånds- och livslängdsbedömning av vattenkraftskonstruktioner. Därför kan beräkningarna handla om analyser av mekaniska spänningar/töjningar såväl som analyser av olika transportprocesser. Transportprocesserna kan inverka direkt på bärförmågan/stabiliteten genom t.ex. temperatur- och vattenflöden/porvattentryck, eller indirekt genom att bärförmågan/stabiliteten sjunker om materialet degraderas, t.ex. genom urlakning eller frostsador. I kapitel 2, 3 och 4 beskrivs översiktligt vattenkraftens konstruktioner och till dessa hörande avancerade tillämpningsberäkningar.

Vidare presenteras i kapitel 4 ett antal fysikaliska fenomen, varav några också inkluderar kemiska reaktioner, som kan behöva beaktas vid byggnad och underhåll av dammar och andra anläggningskonstruktioner av betong. Flera av dessa fenomen kan beskrivas teoretiskt och göras beräkningsbara med en differentialekvation, eller ett system av differentialekvationer. För lösning av sådana ekvationer har avancerade datorberäkningar blivit ett viktigt ingenjörswerktyg. Datorberäkningar ger genom metoder som finita elementmetoden och finita differensmetoden möjlighet att bestämma en åtminstone approximativ numerisk lösning, även i de fall ekvationen är mycket komplex och omöjlig att hantera analytiskt eller genom handberäkningsmetoder. Kapitlet redovisar också några modelltyper och beräkningsverktyg för så väl spännings- som masstransportberäkningar.

När arbetet med denna rapport började var förhoppningen att ta fram anvisningar som vägleder den som granskar avancerade datorbaserade beräkningar. Under arbetets gång upptäcktes, dock, att granskning av avancerade datorbaserade beräkningar är en komplicerad process och, som framförs i kapitel 5, för att uppnå god kvalitet inte bara i beräkningsresultaten utan även i granskningen av beräkningsresultaten krävs det att granskningsprocessen planeras. Det är också viktigt att granskningsprocessen är överenskommen mellan parterna, dvs Beställaren, Beräkningsingenjören och Granskaren.

Vidare måste granskningsprocessen planeras tidigt i projektet och innan beräkningsarbetet påbörjas. För att granskningen ska vara så effektiv som möjligt rekommenderas det att Granskaren utses redan innan beräkningsarbetet påbörjas. I ett tidigt skede bör Beräkningsingenjören och Granskaren vara överens om följande två viktiga dokument som upprättas i olika skeden

- **Analysförutsättningar** som skall upprättas innan själva analyserna genomförs
- **Analysrapport** som skall upprättas efter att analyserna genomförts och där resultat och slutsatser redovisas

I kapitel 6 utvecklas mer i detalj vilka krav som ställs på dessa dokument så att de blir granskningsbara. En mycket viktig del i dokumentationen är Redovisning av analysmodell och indata. I kapitel 7 redovisas några viktiga synpunkter på vad man bör vara observant på som granskare som också kan användas som någon

form av checklista för den som sammanställer rapporterna. Kapitlet ger även anvisningar för granskning av Analysförutsättningar respektive Analysrapport samt själva beräkningarna.

I kapitel 8 beskrivs vilka typer av verifieringar som bör genomföras av numeriska modeller och av dess resultat. Dessa krav är att anse som minimikrav och är inte på något sätt en garanti för att beräkningen är korrekt. Enligt kapitlet är numeriska analyser med finita elementmetoden eller finita differensmetoden approximationer av ett verkligt beteende, och bör åtminstone verifieras med avseende på konvergens, d.v.s. att elementindelning är tillräcklig för att numeriska modellen ska ge samma resultat oavsett förfining av elementindelningen eller användning av högre ordningens element. Vidare bör elementindelningar och bearbetning av beräkningsresultat inte göras så att spänningsfördelningar blir överdrivet utjämnade.

Summary

Hydropower structures are in an environment where the stresses originated from the mechanical as well as physical and chemical phenomena are present and should be considered when designing, and assessing the condition and the service life of the hydropower structures. Therefore, the calculations may involve analyses of mechanical stresses/strains as well as analyses of various transport processes. The transport processes can impact directly on bearing capacity and/or stability through e.g. temperature, and water flow and pore water pressure, or indirectly through e.g. bearing capacity or stability reductions caused by the degradation of the material as a result of, for instance, leaching or frost attack. Chapters 2, 3 and 4 present the hydropower structures and to those associated advanced analyses.

Furthermore, Chapter 4 presents a number of physical phenomena - some of them also include chemical reactions - that may need to be considered when constructing and maintaining dams and other civil engineering concrete structures. Several of the phenomena can be described theoretically and be formulated by means of a differential equation or a system of differential equations. Advanced computer methods have become an important engineering tool for the solution of such equations. Computer calculations based on the finite element and finite difference methods provide at least an approximate numerical solution, even in the cases where the equation is complex and difficult to solve analytically or by other hand calculation methods. The chapter also presents some model types and calculation tools for stress as well as mass transport calculations.

When this work began, the expectation was that to compile a guideline which instructs the reviewer of the advanced computer based calculations. During the work it was, however, discovered that the review of advanced computer based calculation is a complicated process and, as presented in Chapter 5, should be carefully planned to achieve good quality not only in the calculation results but also in the review of the calculation results. It is also important that the reviewing process is agreed between the parties, i.e. the Client, Calculation Engineer and Reviewer.

Furthermore, the reviewing process shall be planned in the early stages of the project and before the calculations begin. In order to conduct the review as efficient as possible, it is recommended that the reviewer be appointed before calculations begin. At an early stage should Calculation Engineer and reviewer agree upon the following two important documents compiled within different phases

- **Assumptions of the analysis** to be prepared before the actual analysis is carried out
- **Report of the Analysis**, which includes the results and conclusions, to be prepared when the analysis is completed

Chapter 6 discusses in more detail the requirements put on these documents in order to make them easy to review. A very important part of the documentation is description of the model of the analysis and the inputs of the model. Chapter 7 describes some important issues, which a reviewer should be aware of, and that

they can also be used as a checklist for the compiler of the reports. The chapter also provides instructions for the review of the Analysis Requirements, the Analysis Report and the Calculation itself.

Chapter 8 describes the types of verification which should be imposed on the numerical models and their results. The requirements are to be considered as minimum, and are in no way a guarantee for the correctness of the calculations. According to the chapter the numerical analyses using the finite element method or finite difference method are approximations of the real behaviour, and should at least be verified with regard to the convergence, i.e. it should be verified that the element subdivision is sufficient so that the numerical model produces the same results regardless of the meshing or use of higher order elements. Furthermore, the mesh should be chosen so that it doesn't affect the actual stress distribution and reflects the real stress distribution.

Innehåll

1	Syfte med anvisningarna	13
2	Typiska konstruktioner inom vattenkraft	14
3	Konstruktionsberäkningar	20
3.1	Inledning	20
3.2	Beräkningar med dator	21
4	Olika typer av beräkningar	23
4.1	Olika fysikaliska fenomen	23
4.2	Modelltyper:	29
4.2.1	Mekaniska analyser	29
4.2.2	Transportanalyser	35
4.3	Beräkningsverktyg:	41
4.3.1	Programvaror avsedda för konventionell dimensionering	42
4.3.2	Specialutvecklad programvara	43
4.3.3	Generella (multi-fysik) FE programvaror	44
4.4	Beräkningarnas syfte, dignitet och omfattning	46
5	Steg i granskningsprocessen	47
5.1	Inledning	47
5.2	Processen	47
6	Dokument	49
6.1	Introduktion	49
6.2	Redovisning av analysmodell och indata	49
6.3	Dokumentet Analysförutsättningar	50
6.4	Dokumentet Analysrapport	50
7	Granskning av Analysförutsättningar och Analysrapporten	52
7.1	Granskning av Analysförutsättningar	52
7.2	Granskning av redovisningen i Analysrapporten - Kontroll av att redovisningskraven är uppfyllda	52
7.3	Granskning av beräkningarna i Analysrapporten	54
7.3.1	Allmänt	54
7.3.2	Vid beräkning av transportprocesser.	54
7.3.3	Vid strukturmekaniska analyser	55
8	Granskning (verifiering) av beräkningsverktyg	56
8.1	Verifiering av beräkningsverktyg för mekaniska problem	56
8.1.1	Konvergens	56
8.1.2	Verifiering av materialmodell	59
8.1.3	Verifierande beräkningar	60
8.2	Verifiering av beräkningsverktyg för transportprocesser	61

9	Verifiering av analysansvariges kompetens för aktuell typ av beräkning och beräkningsverktyg	63
10	Referenser	64

Bilagor

Bilaga 4.1	Mekanik- och transportsanalys; jämförelse mellan ekvationer
Bilaga 4.5	Exempel på beräkningar för vattenkraftskonstruktioner
Bilaga 6.1	Innehållsförteckning för dokumentet "Analysförutsättningar"
Bilaga 6.2	Innehållsförteckning för dokumentet "Analysrapport"

Beteckningar och enheter

SI enheter

Storhet	Enhet	Beteckning
Grundenheter		
Längd	[m] meter	L
Massa	[kg] kilogram	m
Tid	[s] sekund	t
Elektrisk ström	[A] ampere	I
Termodynamisk temperatur	[K] Kelvin	ϑ_K
<i>Enhetsen i celsiustemperaturskalan 1°C är lika med 1 K. De båda skalorna skiljer sig bara i valet av nollpunkt, så att $0^{\circ}\text{C} = 273,15\text{ K}$</i>		
Temperatur (Celsius)	$[^{\circ}\text{C}]$ grad Celsius	ϑ
Substansmängd	[mol] mol	N
Härledda enheter		
Plan vinkel	[rad] radian (m/m)	φ_{rad}
Yta	$[\text{m}^2]$	A
Volym	$[\text{m}^3]$	V
Densitet	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	ρ
Hastighet	$[\text{m}/\text{s}]$	v
Acceleration	$[\text{m}/\text{s}^2]$	a
Tyngdacceleration	$[\text{m}/\text{s}^2]$	g
Kraft	[N] newton	F
Mekanisk spänning	[Pa]	σ
Tryck (vätske- och gastryck)	[Pa]	p
Energi	$[\text{N}\cdot\text{m}]$, [J] joule	E
Effekt	[W], [J/s]	U
Moment	[Nm]	M
Koncentration	$[\text{kg}/\text{m}^3_{\text{mtrl}}]$	C, c
Flödestäthet (värmeflöde)	$[\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})]$ ($[\text{J}/(\text{m}^2\text{s})]$)	J
Diffusionskoefficient	$[\text{m}^2/\text{s}]$	D_c
Diffusivitet	$[\text{m}^2/\text{s}]$	D
Förskjutning	[m]	u
Töjning	[m/m]	ε
Volymlast (Kroppslast)	$[\text{N}/\text{m}^3]$	q
Massflöde	$[\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})]$	J

Värmetillförsel	$[J/(m^3s)]$	Q
Masstillförsel	$[kg/(m^3s)]$	Q
Rörelsemängd	$[kg \cdot m/s]$	p
Faktor för betongens mjuknande i vinkelrätt mot brottyta		μ
Faktor för betongens mjuknande i parallell med brottyta		β
Skadeparameter		d
Skadeparameter orsakad av drag- och tryckspänningar		d_t och d_c
Multipelenheter		
Mikro	10^{-6}	μ
Milli	10^{-3}	m
Kilo	10^3	k
Mega	10^6	M

1 Syfte med anvisningarna

Syftet med denna rapport är att ge vägledning till den som arbetar med granskning av avancerade datorbaserade beräkningar. Rapporten syftar även till att vägleda beställaren av avancerade datorbaserade beräkningar genom att belysa beröringspunkterna mellan beställning och granskning av beräkning-ar. De beräkningar som avses är beräkningar baserade på finita elementmetoden eller motsvarande för analys av mekanik och transportmekanismer i anläggningskonstruktioner av betong i vattenkraftskonstruktioner. Begreppet mekanik inkluderar här spänningar, deformationer, hållfasthet, brott och sprickbildning. Begreppet transportmekanismer inkluderar mass- och värme-flöde i betongen.

Förhoppningen är att vägledningen både skall ge stöd till granskaren och även underlätta kommunikationen med och mellan beställaren och utföraren av beräkningsarbetet. Vägledningen handlar i första hand om övergripande struktur och delar i ett granskningsarbete, och bara undantagsvis om enskilda beräkningstekniska detaljer.

2 Typiska konstruktioner inom vattenkraft

Syftet med detta avsnitt är att visa hur några olika vattenkraftskonstruktioner ser ut och hur laster och miljö kan tänkas påverka dem.

Figur 2-1 - Figur 2-10 visar några exempel på sådana vattenkraftskonstruktioner. Figurerna visar typiska betongdammar och schematiskt vilka förutsättning-er de har för beständighet och att motstå mekaniska laster.

Då konstruktionerna oftast ligger helt oskyddade ute i terrängen påverkas de ofta av naturliga processer, t.ex. omgivande temperaturvariationer i luft, vatten och undergrund liksom av flöden av fukt/vatten. Vanligen är både vatten/fukt och stora temperaturvariationer allestädes närvarande. Dels kan dessa flödesprocesser bryta ner konstruktionen på sikt, vilket ska tas hänsyn till i projekteringen eller i orsaksanalysen om det rör sig om en skadeutredning, dels kan processerna förändra den strukturella belastningen på konstruktionen, t.ex. kan säsongsmässiga temperaturvariationer orsaka stora spänningsvariationer och sprickrisker i betongkonstruktioner. De processer som framförallt kan bryta ner vattenkraftskonstruktioner är erosion, urlakning, frostsador samt temperaturspänningar vid variationer i omgivande temperatur. Mer om hur man lämpligen hanterar sådana påverkningar i beräkningar visas i avsnitt 4.

Man skiljer ofta på stabilitets- och snittkraftsberäkningar för vattenkraftskonstruktioner. Hela dammdelar, eller monoliter som ingår i en dammdel, kontrolleras vanligen för stabilitetssäkerhet där konstruktionen anses verka som en stel kropp, som stälper runt en punkt/axel vid, eller nära, nedströmskanten eller som glider mot undergrunden.

Dammdelarna/monoliterna kontrolleras också avseende snittkrafter. Typiska statiska verkningssätt är oftast platt- eller balkböjning. Då monoliterna ofta är höga och breda i förhållande till tjockleken beskrivs verkningssättet oftast bäst med en solidmodell eller en plan spänningsmodell.

Inom vattenkraft och dammbyggnad anger man alltid riktningar i strömriktningen.

Figur 2-1 visar en regleringsdamm med en betongdamm med anslutande korta fyllningsdammar på ömse sidor. I betongdammen finns tre stycken utskov med totalt tre stycken luckor, varav den mittersta för tillfället då fotot togs var öppen.



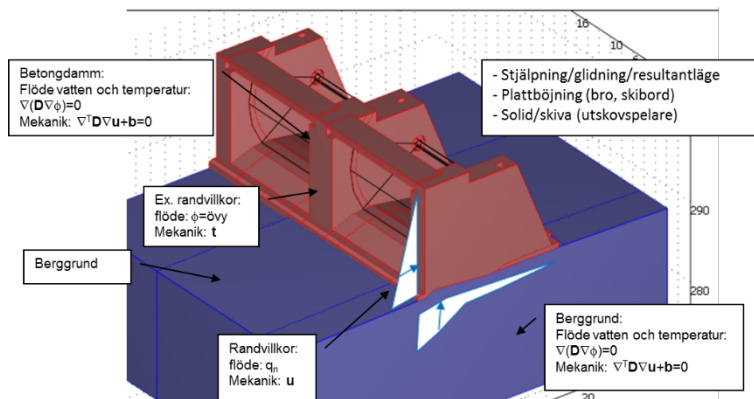
Figur 2-1 Utskovsdamm.

Figur 2-2 visar en utskovsdamm med två utskov, varav det vänstra i strömriktningen är öppet när fotot togs.



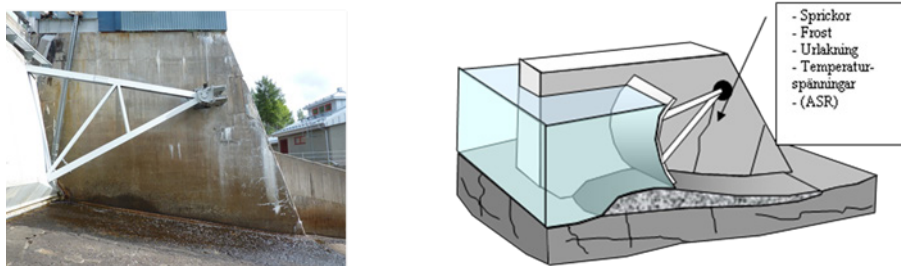
Figur 2-2 Utskovsdamm.

Figur 2-3 visar en modell av en utskovsdamm, samma damm som Figur 2-2 visar. I figuren visas också de vanliga flödesberäkningar (vattenflöde och temperaturflöde) samt mekanisk beräkning som brukar förekomma.



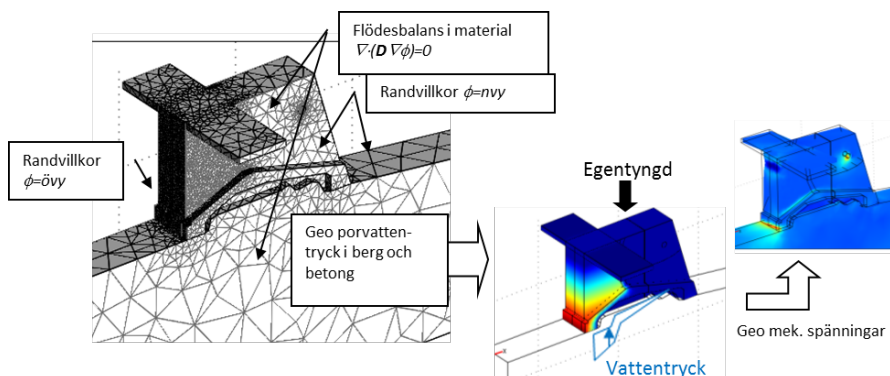
Figur 2-3 Modell av utskovsdamm med 2 st utskov.

Figur 2-4 visar en utskovsdamm med pelare. Figuren anger också vilka typer av skador som förekommer i just denna pelare.



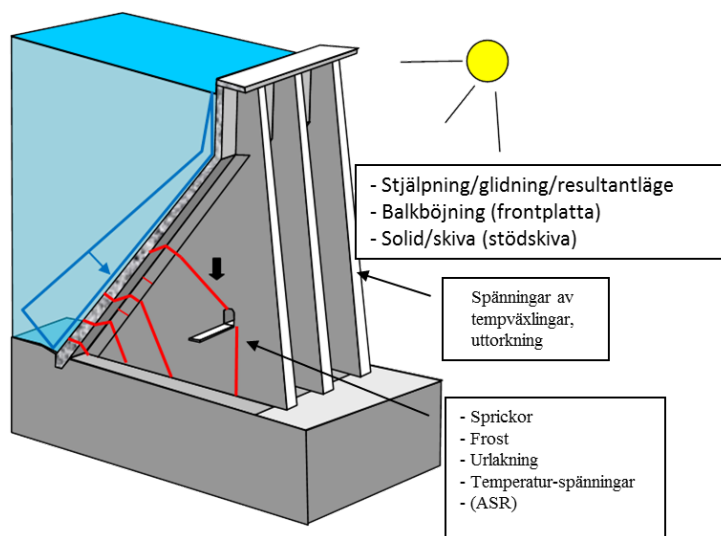
Figur 2-4 Pelare i utskovsdamm.

Figur 2-5 visar beräkningsmodellen för utskovspelaren i Figur 2-4. Beräkningarna i just denna figur rör sig om dels porttrycksberäkning med efterföljande stabilitetsberäkning.



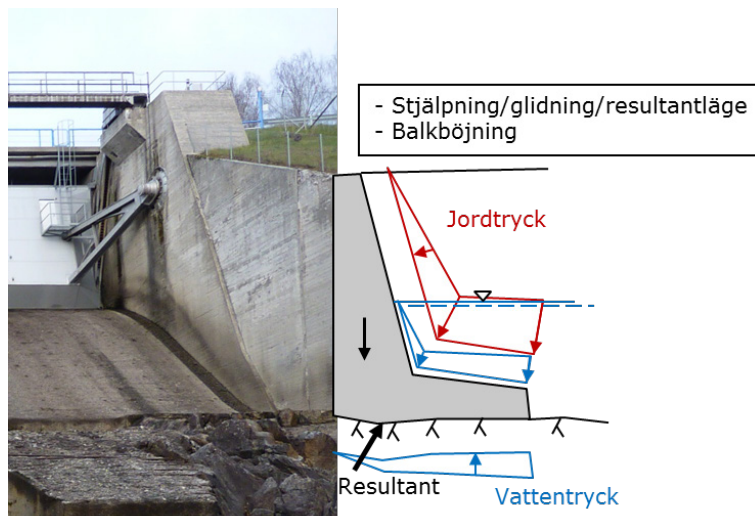
Figur 2-5 Pelare i utskovsdamm. Beräkning av porvattentryck och mekaniska spänningar.

Figur 2-6 visar en vanlig dammtyp, en s.k. "lamelldamm". Dammen består av en rad av monoliter ställda intill varandra. Varje monolit består av en stödjande pelare/skiva och en frontplatta i form av en konsol som kragar ut en viss bredd på ömse sidor mot vattensidan. Vanliga skador i dessa typer av dammar är temperatursprickor p.g.a. att de oftast har utförts utan någon värmeisolerande vägg nedströms. Av samma orsak förekommer ofta frostsador i frontplattan, då fukt tränger igenom plattan och möter kyla under vintern.



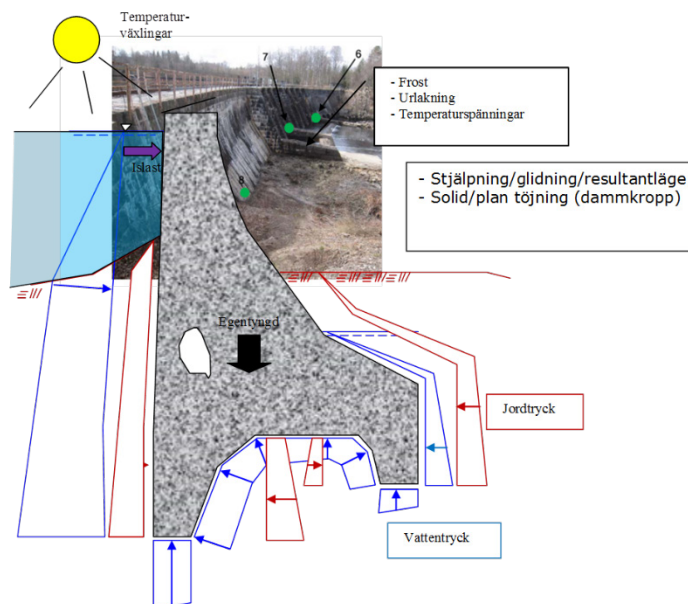
Figur 2-6 Lamelldamm.

Figur 2-7 visar en stödmur som stödjer nedströmsslänten av en fyllningsdamm, samt även utgör ledmur för vattenflöde genom utskovet som syns i figuren. Sådana stödmurar är väsentliga för fyllningsdammens stabilitet. Om de stjälper så kan även fyllningsdammen rasa. Viktigt för dessa stödmurar är att om de antas vara dränerade på jordsidan ska dessa dräneringar kunna kontrolleras, annars ökar lasten som vill stjälpas muren.



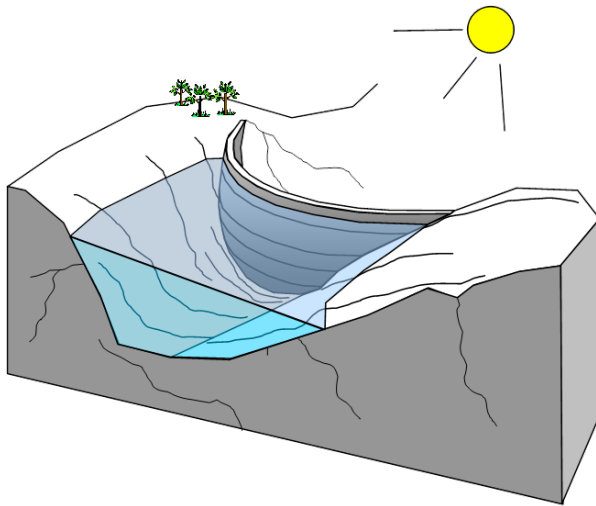
Figur 2-7 Ledmur/stödmur

Figur 2-8 visar en gammal gravitationsdamm i södra Sverige som är grundlagd på lösmassor. Viktiga laster mot sådana dammar är pådrivande vatten- och jordtryck mot uppströmssidan samt inte minst upptrycket (porvattentrycket) under dammen. Då betongen i dammen ofta är otät sipprar vatten långsamt igenom dammen och då medför en långsam men stadig nedbrytning genom urlakning och frostsador.

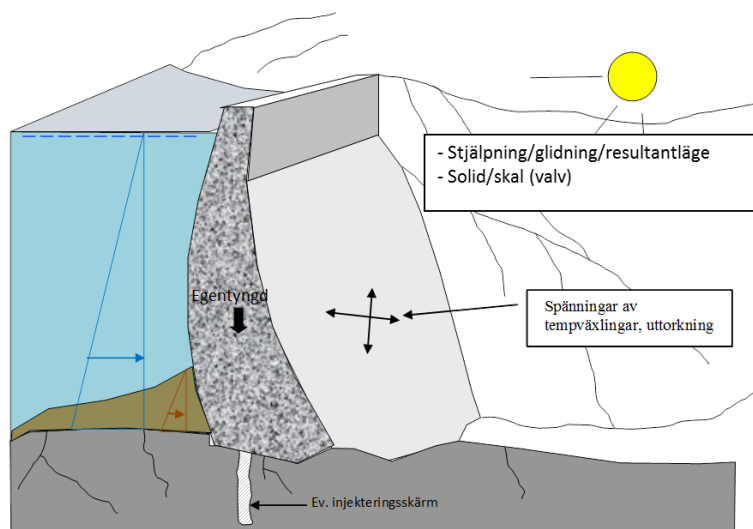


Figur 2-8 Gravitationsdamm, laster.

Figur 2-9 och Figur 2-10 visar principiellt en valvdamm. Kännetecknande för sådana dammar är att de är känsliga för sättningar i anfangen samt om valvet får imperfektioner. Om de utförs med otillräcklig värmeisolering kan omfattande sprickbildning uppstå i valvet p.g.a. temperaturvariationer över året. Sådan sprickbildning medför en imperfektion, vilket kan bli kritisk för valvets funktion.



Figur 2-9 Valvdamm.



Figur 2-10 Valvdamm.

3 Konstruktionsberäkningar

3.1 INLEDNING

Beräkningar för vattenkraftskonstruktioner syftar i allmänhet till att kontrollera, eller dimensionera, konstruktionens bärförmåga, stabilitet och beständighet.

Beräkningarna kan röra sig om analyser av mekaniska spänningar/töjningar såväl som analyser av olika transportprocesser. Transportprocesserna kan inverka direkt på bärförmågan/stabiliteten som t.ex. temperatur- och vattenflöden/porvattentryck, eller indirekt genom att bärförmågan/stabiliteten sjunker om materialet degraderas, t.ex. genom urlakning eller frostsador.

Beräkningar är i allmänhet nödvändiga vid utformningen av en konstruktion. De är ofta också nödvändiga vid skadeutredningar där det inte är självklart varför skadan uppstått samt vilka verkningar de kan ha medfört på konstruktionen, t.ex. vid sprickbildning i en dammdel. Vidare kan beräkningar vara nödvändiga vid verifikation inför en granskande myndighet. De är även en viktig del av dokumentationen av tankegången bakom konstruktionens utformning.

”Beräkningar ska utföras enligt mekanikens, fysikens och hållfasthetslärans regler för en beräkningsmodell som i rimlig utsträckning beskriver konstruktionens verkningssätt i de aktuella gränstillstånden [14], SBN avd. 2A, 1980.

”Beräkningars uppställning ska vara så överskådlig och deras framställning så logisk, sammanhängande och fullständig att en teknisk kunnig granskare kan följa dem från början till slut. Detta gäller då de utförs såväl för hand som med dator, [17].

Beräkningsdokumentet måste vara tydligt upprättat med kapitelindelning, figurer och sidnumrering. Problemställningen och konstruktionen ska vara tydligt beskriven liksom beräknings- och lastmodellen. Beräkningsmetoden ska vara tydligt visad. Resultat ska kunna följas och kontrolleras, i alla fall stickprovvis. Finns ställningstagande gjorda av beräkningsresultaten ska dessa helst finnas i ett diskussionskapitel, vilket senare ska utmynna i slutsatser av beräkningarna.

Enligt [15], avsnitt 1.1:

1. EN 1990 fastställer principer och krav för bärverks säkerhet, brukbarhet och beständighet, beskriver grunderna för deras dimensionering och verifiering samt ger vägledning för närliggande frågor som rör tillförlitligheten hos bärverk.
2. EN 1990 är avsedd att användas tillsammans med EN 1991 t.o.m. EN 1999 för dimensionering av byggnader och anläggningar, inklusive geotekniska aspekter, dimensionering av bärverk vid brand, situationer som omfattar jordbävningar, utförandeskedet samt tillfälliga konstruktioner. ANM. För dimensionering av speciella byggnadsverk (t.ex. kärnkraftverk, dammar, m.m.), kan andra regler och föreskrifter erfordras än de som anges i EN 1990 t.o.m. EN 1999.

För beräkningar av nya vattenkraftskonstruktioner, eller ombyggnad av befintliga, bör Eurokoderna användas generellt.

Då vissa lastvärden, koefficienter, etc, som berör vattenkraftskonstruktioner inte framgår av Eurokoderna eller i aktuell utgåva av EKS [6], måste dessa beskrivas och förtydligas i beräkningarna.

Det hänvisas generellt till SS-EN 1990 och EKS 9 (2013) Eurokod 2 (2010), samt där så är aktuellt till EN1991 – EN1999.

För termer och definitioner samt beteckningar hänvisas till SS-EN1990 avsnitt 1.5 resp. 1.6.

För beräkningskontroller av befintliga vattenkraftskonstruktioner är det inte självklart att Eurokoderna ska användas. I dagsläget används normalt ett beräkningsformat enligt RIDAS, d.v.s. utan partialkoefficienter men med en pålagd totalsäkerhet vid stabilitetskontroller och med en förstöringsfaktor γ_h på lasteffekterna och partialkoefficienter för material och säkerhetsklass vid snittkrafts-kontroller.

Vid beräkningskontroller av befintliga konstruktioner är det viktigt att ev. skador är beaktade. T.ex. kan sprickbildning vid frostsador eller större sprickor härrörande från temperaturspänningar förändra det statiska systemet, samt bärförmåga hos materialet.

Vid kontroll av befintliga konstruktioner kan också relativt ofta styrande materialvärden provas genom undersökningar i den befintliga konstruktionen. T.ex. mätning av densitet, hållfasthet, mått, karbonatiseringsdjup, etc.

3.2 BERÄKNINGAR MED DATOR

Användningen av dator för numeriska beräkningar ökar alltmer. Det är positivt då mer nyanserade analyser kan göras mot tidigare, t.ex. av samtidigt verkande fysikaliska händelser såsom t.ex. temperaturflöden, fukt/vattenflöden och mekanisk respons, eller t.ex. analyser av uppsprickning i betong. Det är även positivt då användning av dator frigör ingenjören från tidskrävande sifferhantering. Det kan även på ett åskådligt sätt visa resultat i 3D och i färg som underlättar för betraktaren att förstå händelseförlopp och resultat.

Dock är det vid beräkningar med dator extra viktigt att beräkningsdokumentet görs lättillgängligt för läsaren och granskaren, t.ex. genom en tydlig beräkningsrapport med t.ex. Beskrivning, Modeller, Beräkningsmetod, Resultat, Diskussion och Slutsatser samt rikligt med figurer och hänvisningar. Det finns annars en klar risk att den som ska granska beräkningen inte kan eller orkar följa redovisningen till slut. Redovisningen ska klart visa (se även i avsnitt 4.4, 4.5 samt 5 - 9):

- Programbeskrivning.
- Är programmet relevant för studien? Finns begränsningar?
- Är programmet kontrollerat?
- Redovisning, helst med figurer, av material, struktur- och lastmodell. Bl.a. för att kunna avgöra om modellen kan återge verkligheten på rimligt sätt.

- Redovisning av använda indata inkl. källhänvisningar, så att det går att avgöra om dessa är korrekta och rätt använda.
- Resultatredovisning på ett tydligt sätt.
- Resultatets rimlighet, t.ex. genom kontroll med en enkel handberäkning.
- Tolkas och används resultaten på rätt sätt?

4 Olika typer av beräkningar

4.1 OLIKA FYSIKALISKA FENOMEN

Det finns ett antal fysikaliska fenomen, varav några också inkluderar kemiska reaktioner, som kan behöva beaktas vid bygge och underhåll av dammar och andra anläggningskonstruktioner av betong. Flera av dessa fenomen kan beskrivas teoretiskt och göras beräkningsbara med en differentialekvation, eller ett system av differentialekvationer. För lösning av sådana ekvationer har avancerade datorberäkningar blivit ett viktigt ingenjörswerktyg. Datorberäkningar ger genom metoder som finita elementmetoden och finita differensmetoden möjlighet att bestämma en åtminstone approximativ numerisk lösning, även i de fall ekvationen är mycket komplex och omöjlig att hantera analytiskt eller genom handberäkningsmetoder.

Här skall olika fenomen omnämnas och i någon mån grupperas på två sätt: dels ganska allmänt utifrån fenomenens fysikaliska och motsvarande matematiska karaktär, dels mer konkret exemplifieras utifrån ett livscykelperspektiv för en betongkonstruktion.

En gruppering med utgångspunkt från fysikalisk karaktär är:

- 1) Mekanik för betongmaterial och betongkonstruktion.
 - struktur- och materialmekanik (deformationer, spänningar, bärförmåga, sprickbildning)
- 2) Transportprocesser i betong.
 - värme (ledning, konvektion)
 - masstransport i material (diffusion, konvektion, flöde)
 - kopplade transportprocesser (värme-massa-fasomvandlingar)
- 3) Kopplade mekanik-transport processer.
 - deformationer-spänningar-sprickor-värme-masstransport-fasomvandlingar- kemiska omvandlingar
- 4) Strömning i vätskor och gaser.

Punkten 4), beräkning av strömning i vätskor och gaser, kan som exempel handla om beräkning av vind- och våglaster eller flödesbeteende för en färsk ännu inte hårdnad betong. Strömningsberäkningar (CDF, Computational Fluid Mechanics) ligger emellertid utanför denna rapport och kommer därför inte att diskuteras vidare.

Uppdelningen i mekanik- och transportproblem återspeglas i differentialekvationernas karaktär. Mekanikproblemen har oftast ett vektorfält (oftast för förskjutningen) som primär obekant i ekvationen medan transportproblemen har ett skalärfält (oftast för temperatur eller masskoncentration) som primär obekant. Antingen det handlar om vektor- eller skalärfält kan analysen rumsligt avse en punkt eller ha en 1D, 2D eller 3D utsträckning och vidare vara

tidsberoende eller tidsberoende. Ekvationen med det obekanta vektor- eller skalärfältet kan således ha en, två, tre eller fyra oberoende variabler. Analys som rumsligt avser en punkt kan som exempel gälla en kemisk nedbrytningsprocess eller något annat tidsberoende förlopp.

För mekanikproblem motsvaras olika typer av tidsberoenden av statisk, kvasistatisk, stationärt dynamisk eller transient dynamisk analys. Vid kvasistatisk analys är rörelserna så långsamma att tröghetskrafter kan försummas, sådana rörelser kan orsakas av långsam lastpåföring eller av krypning i materialet. Vid stationärt dynamiskt och transient dynamiskt förlopp måste tröghetskrafterna beaktas och motsvarar ett cykliskt svängningsförlopp respektive ett hela tiden föränderligt förlopp. Beroende på om tid inverkar på transporthastighet eller inte, är transportprocesser på motsvarande sätt stationära eller transienta.

De x-, y- och/eller z-koordinater som används vid transportberäkningar är i allmänhet rumsfixerade (Euler) och de som används vid mekanikberäkningar är i allmänhet materialpartikelfixerade (Lagrange). Vid mekanikberäkningar sammanfaller de två koordinatsystemen om den lastinducerade ändringen av konstruktionens geometri inte behöver beaktas vid uppställning av jämviktsekvationer.

Gemensamt för mekanik- och transportproblemen är att materialet på någon materialstrukturnivå betraktas som kontinuerligt. Det kan vara att betongen betraktas som en kontinuerlig massa, den armerade betongen kan betraktas som kontinuerlig massa eller så kan t.ex. betong betraktas som en struktur bestående av ett kontinuum som representerar cementbruk och ett som representerar ballastkorn. Kontinuumteori utgör således en bas för de teorier och ekvationer som löses med hjälp av datorberäkningarna. I kontinuumteori för mekanikproblem utgör kraftjämviktsekvationerna för en liten materialvolym de centrala sambanden. För masstransportproblem är på motsvarande sätt massbalansekvationen central och för värmeledningsproblem energibalansekvationen.

Kraftjämvikterna i mekanikproblemen uttrycker jämvikt mellan spänningsderivator, kroppslaster (t.ex. egenvikt) och eventuella tröghetskrafter för ett litet materialelement, och spänningarna är därvid via en kedja av samband uttryckta i förskjutningar. Sammantaget är differentialekvationerna som uttrycker kraftjämvikt uppbyggda via sambandskedjan: kroppslast-spänning-töjning-förskjutning. Detta är illustrerat i Figur 4-1a). Den motsvarande sambandskedjan är för värmeledningsproblem illustrerad i Figur 4-1b). Sambandskedjan för masstransportproblem kan sägas vara analog med den för värmeledning. I bilaga 4.1 "*Mekanik och transportanalys; jämförelse mellan ekvationer*" jämförs ekvationer för fallet 1D-analys.

Aktuell differentialekvation plus aktuella randvillkor ger mha finita elementberäkning eller motsvarande de obekanta förskjutningarna respektive temperaturerna eller masskoncentrationerna. Om systemet av differentialekvationer är olinjärt görs normalt beräkningen inkrementellt med uppdelning av lastpåföringen eller tiden i små steg. Beroende på numerisk metod kan inom varje steg också beräkningsiterationer göras, för att få förbättrad

numerisk noggrannhet. Med den primärt obekanta storheten känd kan sedan också spänningar respektive värmeflöde, etc, beräknas. Detta och de övergripande stegen i teoretisk modellering och beräkningsanalys av fysikaliska fältproblem är illustrerat i Figur 4-2. De i denna figur omnämnda typerna av randvillkor, Dirichlet, Neumann och Robin svarar för generell ekvation mot föreskrivet värde på den obekanta storheten, föreskrivet värde på dess derivata respektive på konvektivt samband mellan värde och derivata.

För relevant granskning av en avancerad datorberäkning som handlar om analys av ett fysikaliskt fenomen är det viktigt att dokumentationen ger information om förutsättningar, antaganden, modeller och metoder motsvarande de tre stegen visade i Figur 4-2. Detta diskuteras närmare i andra delar av denna rapport.

En viktig aspekt som vid övergång från punkten 1, fysikalisk verklighet, till punkten 2, teoretisk modell, kan beaktas, eller inte beaktas, är att den fysikaliska verkligheten är stokastisk i praktiskt taget alla avseenden. För många situationer kan deterministisk analys med antaganden om homogena material, väldefinierade kända laster och exakt geometri etc bedömas vara tillfylles, kvantifierade antingen som medelvärden eller som i någon mening på säkra sidan valda fraktilvärden. För andra situationer där det handlar om att beräkna sannolikhet för olika händelser måste de verkliga fenomenens stokastiska karaktär på något sätt ingå i den teoretiska modellen.

De differentialekvationer som beskriver ett fysikaliskt fenomen kan vara linjära eller olinjära. Olinjära ekvationer är på flera sätt svårare att hantera, särskilt om det handlar om kopplade fenomen med ömsesidig interaktion mellan olika obekanta storheter. Dessbättre är det vid analys av betongkonstruktioner ganska sällan nödvändigt att beakta ömsesidig interaktion, däremot är olinjära problem vanliga. Ensidig påverkan (koppling), t.ex. att ett beräknat temperaturfält utgör del av indata till en spänningsberäkning, medför inga principiella komplikationer.

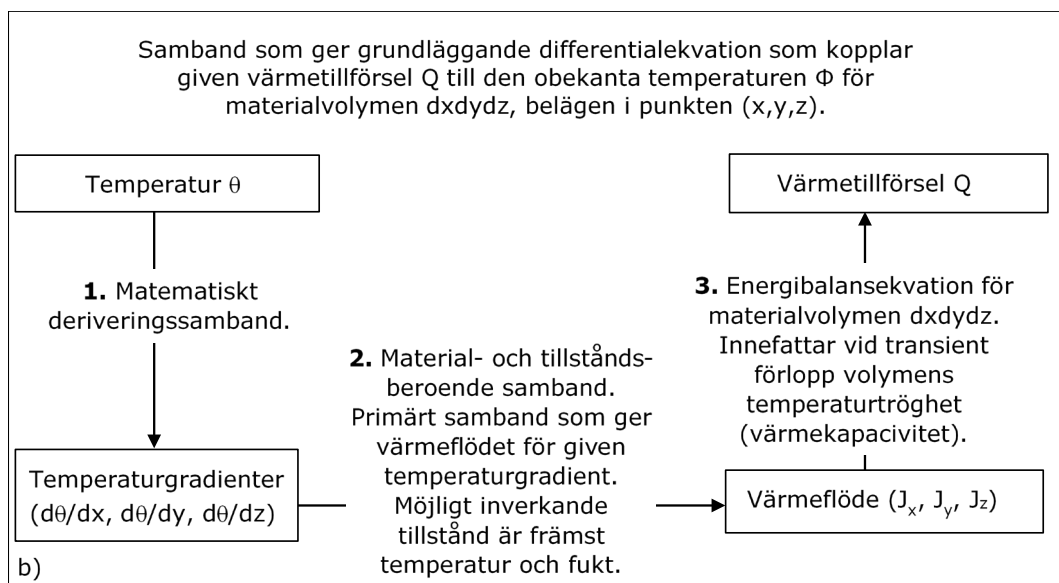
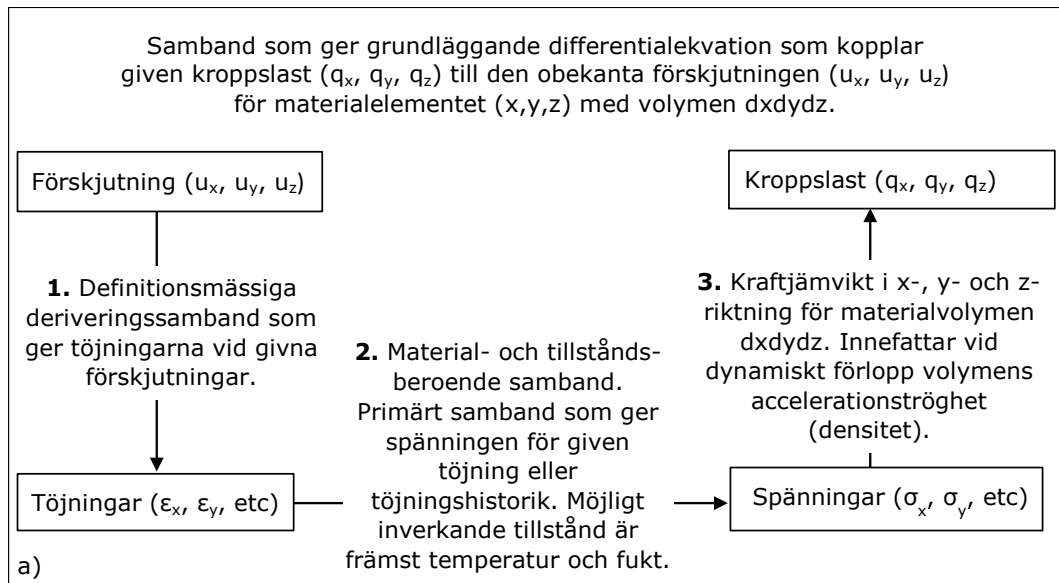
För mekanikproblem kan olinjäritet uppkomma i vart och ett av de tre delsambanden 1-3 visade i Figur 4-1a), och även i randvillkoren. Sambandet 1 är linjärt om deformationerna är små så att töjningarna kan betraktas som proportionella mot förskjutningarna, vilket oftast torde vara en helt rimlig approximation vid analys av betongkonstruktioner. Sambandet 2 är linjärt så länge som materialets beteende är linjärt elastiskt. Sambandet 3 är linjärt om den av belastning orsakade geometriändringen av konstruktionen är liten så att jämviktsekvationerna kan ställas upp för konstruktionen i ett fixt referensläge, t.ex. dess obelastade läge. För betongkonstruktioner torde olinjäritet i första hand uppkomma genom materialolinjäritet. För slanka konstruktioner med benägenhet för geometrisk instabilitet som t.ex. pelarknäckning är olinjäritet i jämviktsekvationerna viktig. Olinjäritet i randvillkor kan uppkomma om lasters storlek, riktning eller placering påverkas av konstruktionens deformationer.

För värmeledningsproblem och i än högre grad för masstransportproblem är transient och olinjärt beteende det vanliga. Detta betyder att beräkningarna nästan alltid måste genomföras inkrementellt med uppdelning av förloppet i korta tidssteg. Särskilt för kopplade temperatur-transport fenomen, som inte sällan involverar fasomvandlingar, kan både den teoretiska modellen och motsvarande

beräkningsmetod bli komplex. Som en illustration av detta visas i Figur 4-3 ett typiskt flödesschema som kan ligga till grund för en datoralgoritm för numerisk beräkning. Även om det fysikaliska fenomenet kan vara mycket komplext vid värme- och masstransport så blir tillgänglig datorkapacitet oftast inte en primärt begränsande faktor, beroende på att dessa problem, till skillnad från flertalet mekaniska problem, har skalärfält som primär obekant.

Särskilda frågeställningar uppkommer vid hantering av fysikaliska fenomen som ger singulariteter och/eller instabiliteter. Ett sådant fenomen är uppkomst och tillväxt av sprickor. Uppkomst av sprickor motsvaras av töjningsinstabilitet och töjningslokalisering. Odefinierade, singulära, oändligt stora töjningar och/eller spänningar kan teoretiskt, beroende på beräkningsmodell, uppkomma också vid skarpa hörn och andra geometriska och/eller materialmässiga abrupta övergångar. Samma problem återfinns vid värme- och masstransportanalys, beroende på beräkningsmodell kan teoretiskt oändligt stora temperaturgradienter respektive transporthastigheter uppkomma, t.ex. i hörnpunkter. Ett med instabilitet närbesläktat generellt fenomen är bifurkation, förgrening. Vid kritisk storlek på belastning eller annan påverkan som motsvarar ett bifurkationsläge kan det fortsatta beteendet ske på två eller flera olika alternativa sätt som alla uppfyller aktuell differentialekvation.

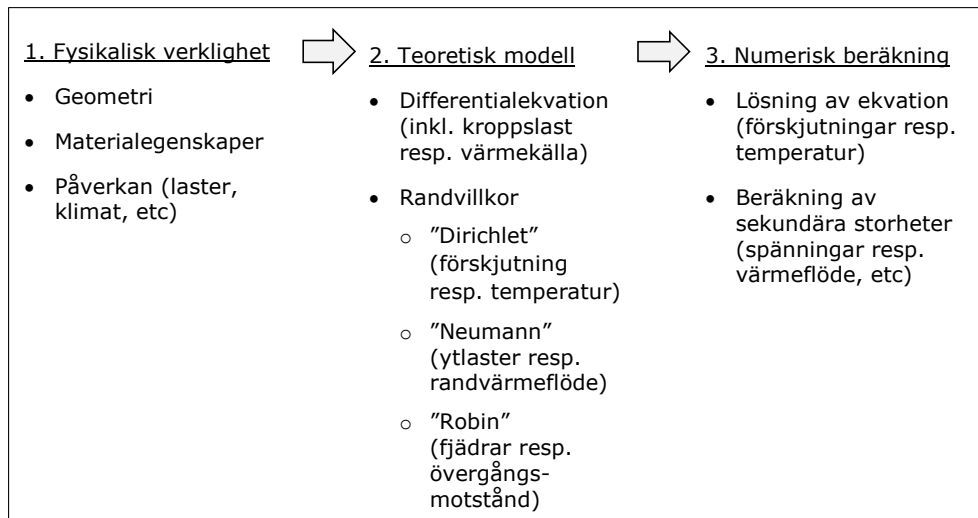
Olika fenomen har ovan diskuterats ganska allmänt. Som avslutning ges emellertid i Figur 4-4 ett antal konkreta exempel på frågeställningar och fenomen som kan kräva avancerade datorberäkningar i samband bygge och underhåll av anläggningskonstruktioner av betong.



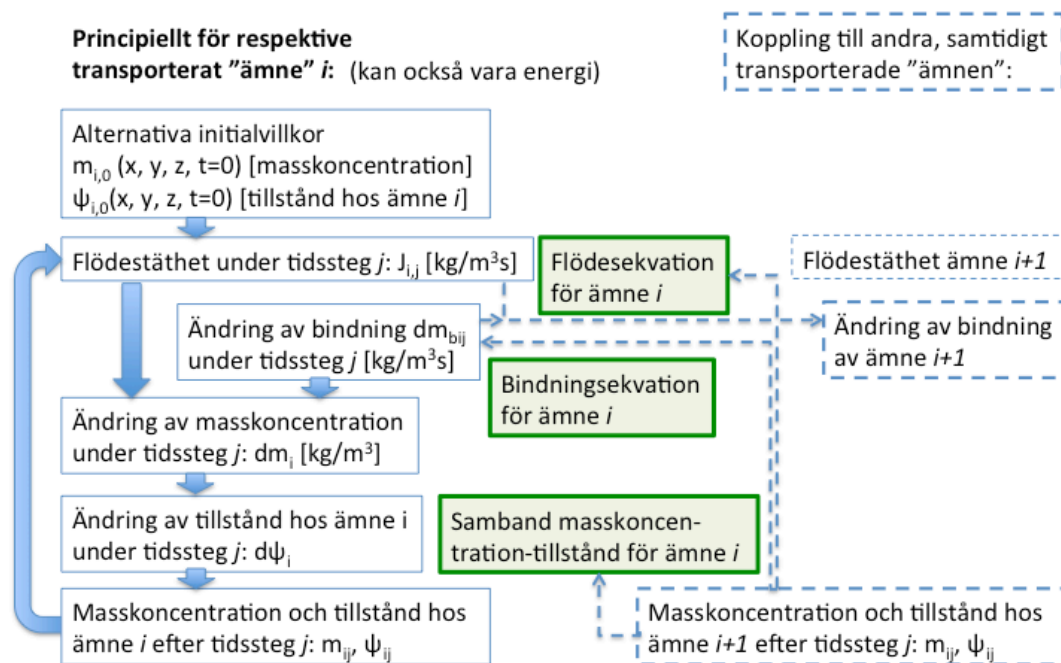
Figur 4-1 Samband som bygger upp ekvation för 3D analys av fysikaliska fenomen

a) Ekvation för mekanikberäkning av deformierbar kropp med förskjutning som obekant.

b) Ekvation för värmeledningsberäkning med temperatur som obekant.



Figur 4-2 Övergripande steg i teoretisk modellering och beräkningsanalys av något fältproblem som handlar om mekanik och hållfasthet alternativt temperatur och värmeledning, t.ex. för någon betongkonstruktion



Figur 4-3 Exempel på ett typiskt beräkningsschema för numerisk analys av ett masstransportfenomen

Inför byggske

- Gjutning
 - Flödesanalys för betongmassa
- Härdning
 - Värmeanalys för bestämning av temperatur och hydratationsgrad
 - Mekanik- och värmeanalys av egenspanningar och sprickbildning

Inför och under brukarskede

- Deformationer, hållfasthet och sprickbildning
 - Vid statisk hög kortvarig belastning
 - Vid statisk långvarig belastning med krympning, krypning och relaxation
 - Vibrationsanalys, t.ex. för aggregatnära konstruktioner
 - Exceptionell statisk och dynamisk belastning vid olycka, stöt, jordbävning
 - Porttrycksanalys för bestämning av upptryck
 - Vid gradvisa sättningar i undergrund och vid brott i försvagningszoner i berg
 - Vid temperaturförändringar och gradienter
 - Vid anslutningar till nygjutning vid reparation och tillbyggnad
- Beständighet
 - Temperaturanalys för av bedömning av reaktionshastigheter
 - Masstransportanalys av vattenomsättningshastighet och urlakning av betong
 - Diffusionsanalys för koldioxidinträngning (karbonatisering)
 - Diffusionsanalys för salter (korrosion, frostsprängning), och urlakning av betong
 - Kopplad värme- och transportanalys för vatten mht fasomvandlingar (frostsprängning)
 - Kopplad mekanik- och transportanalys mht sprickbildning och armeringskorrosion, samt spricktillväxt orsakad av urlakning av betong
 - Mekanik och transportanalys mht sprickor och täthet
 - Porttrycksanalys för bestämning av upptryck
 - Kopplad mekanik, kemisk och fysikalisk nedbrytning (inre expansion i kombination med nedsatta mekaniska egenskaper orsakade av t.ex. alkali-kisel reaktioner, frost- och sulfatangrepp)

Figur 4-4: Skeden och fenomen som för analys av en betongkonstruktion kan kräva avancerade datorberäkningar

4.2 MODELLTYPER:

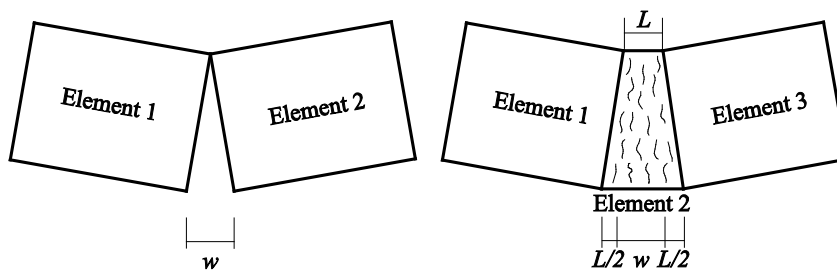
4.2.1 Mekaniska analyser

En av de viktigaste orsakerna till icke-linjärt beteende hos betongkonstruktioner är relaterade till uppsprickning. Andra viktiga källor till icke-linjärt beteende kan vara orsakade av t.ex. krypning vid hög konstant belastning, interaktion så som friktion, etc.

I detta avsnitt avses att ge en generell beskrivning av väl etablerade modeller som används för att beskriva betongens icke-linjära beteende. Fokus i detta avsnitt är av naturliga skäl på uppsprickning, eftersom detta är den dominerande orsaken.

Det finns två övergripande metoder att beskriva uppsprickningen i ett material, som utjämnat/utsmetat över elementen (smeared) eller som diskreta sprickor t.ex. emellan elementen, se Figur 4-5. Den huvudsakliga skillnaden mellan dessa två metoder är att i den utsmetade metoden (smeared cracking) är sprickorna fördelade över elementet, dvs. det uppstår inga fysiska sprickor i beräkningsmodellen. I den diskreta sprickmodellen uppstår sprickor t.ex. emellan elementen och skapar fysiska sprickor i beräkningsmodellen. Detta kan åstadkommas genom kopplingar mellan varje element som beskrivs med särskilda egenskaper (interface element) vilka motsvarar sprickornas brottmekaniska beteende. Övriga element i modellen kan då t.ex. beskrivas med endast med elastiska egenskaper.

Den största skillnaden mellan metoderna är att vid modellering med den utsmetade sprickmetoden krävs ingen förkunskap om var sprickorna kommer att uppträda, medan i den diskreta sprickmetoden kan endast sprickor uppstå vid de fördefinierade zonerna mellan elementen. Det finns metoder så att beräkningsmodellen uppdaterar elementnätet (adaptive mesh technique) på grund av sprickpropageringen. Dessutom, finns det metoder där sprickorna kan dela på befintliga element (extended FEM, XFEM) och därmed uppträda oavsett de fördefinierade elementen. Nackdelen med dessa metoder är dock att de är beräkningskrävande och kan av den orsaken vara, svåra att tillämpa på verkliga konstruktioner. En nackdel med utsmetade metoder är att de kan ha ett visst beroende av elementnätet, detta gäller särskilt för de fall då uppsprickningen beskrivs i termer av spänning och töjning. För att reducera detta beroende av elementnätets storlek bör uppsprickningen beskrivas i termer av spänning och förskjutning med hjälp av en lokaliseringsteknik där töjningarna är associerade med en sträcka som benämns "sprickband" vilken t.ex. kan vara beroende på elementlängd. [11]



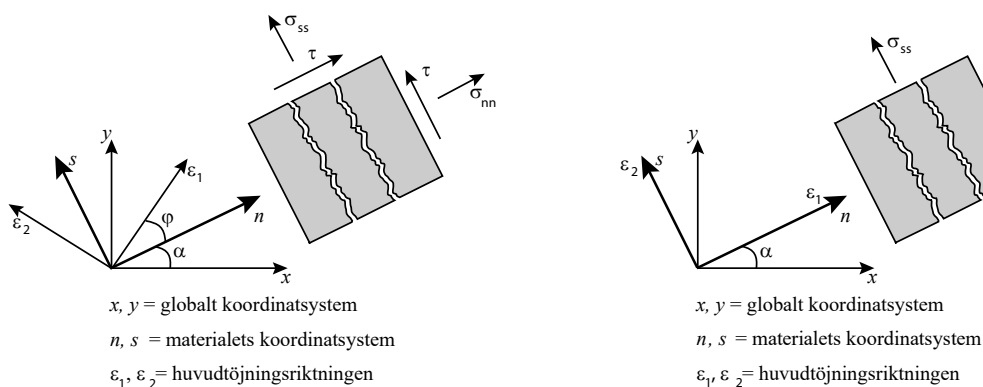
Figur 4-5: Diskret sprickmetod (till vänster) och utjämnad/utsmetad metod (till höger) för beskrivning av sprickor, [10].

Det finns flera olika teorier för hur betongens icke-linjära beteende kan beskrivas. Dessa baseras huvudsakligen på brottmekanik, plasticitetsteori och/eller skademekanik. Gemensamt för dessa teorier är att mikrosprickor initieras då huvuddragspänningen uppnår betongens draghållfasthet samt att uppsprickningen beskrivs som en reduktion av materialets styvhet.

Ett exempel på en något förenklad betongmodell som plasticeras och där E-modulen degraderas ges i exempel i Bilaga 4.5.

Brottmekaniska modeller

De materialmodellerna som tillämpas för att simulera uppsprickning i betong är vanligen baserade på brottmekanik. Inom brottmekaniska utsmetade materialmodeller (smeared crack approach) finns två varianter för att beskriva hur en spricka propagerar efter sprickinitiering. En mikrospricka initieras i elementets integrationspunkt där dess sprickbredd/sprickvidd har samma riktning som huvuddragspänningen (huvuddragtöjningen). Vid fortsatt belastning kommer uppsprickningen att ske olika beroende på om en fix eller roterande sprickmodell används. Skillnaden mellan dessa två metoder illustreras i Figur 4-6.



Figur 4-6 Illustration av en fix (vänster) respektive roterad (höger) brottmekanisk sprickmodell, [4].

I den fixa sprickmodellen, kommer sprickan i denna integrationspunkt att bibehålla denna riktning oavsett om/hur spänningsfältet roterar vid fortsatt belastning. Vid ett läge då huvudspänningsriktningarna ej längre överensstämmer med sprickans riktning så innebär detta att en skjuvspänningsterm introduceras i sprickan. Det innebär att för att kunna beskriva en fix sprickmetod så behöver vi beskriva hur stora skjuvspänningar som kan överföras vid en spricka. I normal anläggningsbetong så uppkommer sprickor i cementpastan och propagerar emellan ballasten. Sprickans yta blir därför oregelbunden och det ger upphov till ett skjuvmotstånd i sprickan. Valet av skjuvmotstånd (*shear retention factor*) kan ha en signifikant inverkan på resultatet och beräkningar bör presenteras som påvisar dess inverkan.

I en roterande sprickmodell kommer alltid sprickan att ställa in sig efter spänningsfältet, det vill säga om spänningsfältet roterar så kommer sprickan att rotera med. Eftersom sprickan ställer in sig i förhållande till huvudspänningsriktningen så uppkommer endast två spänningar i sprickans utsträckning, huvudtryckspänning som verkar i sprickans längsriktning (vinkelrätt sprickvidden) och huvuddragspänningen som verkar i den riktning som sprickan öppnar sig (sprickviddsriktningen). Eftersom sprickan ställer in sig efter huvudspänningsriktningarna så uppstår därmed inga skjuvspänningar i sprickplanet.

Förhållandet mellan spänning och töjning i materialet definieras enligt nedan

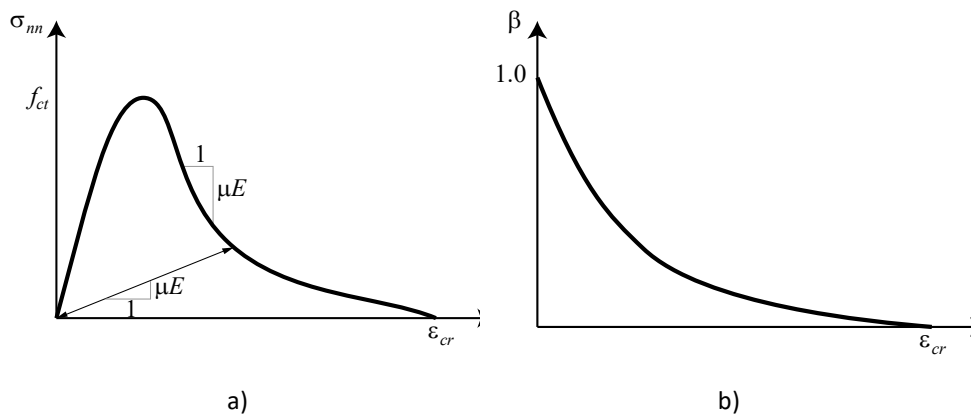
$$\boldsymbol{\sigma}_{ns} = \mathbf{D}^s \boldsymbol{\varepsilon}_{ns} \quad (4.1)$$

För ett fall med plant spänningstillstånd där tvärkontraktionen förutsätts vara lika med noll, kan spännings och töjningstermerna definieras enligt,

$\boldsymbol{\sigma}_{ns} = (\sigma_{nn}, \sigma_{ss}, \sigma_{ns})^T$ (där $\sigma_{ns} = \tau$) samt $\boldsymbol{\varepsilon}_{ns} = (\varepsilon_{nn}, \varepsilon_{ss}, \varepsilon_{ns})^T$ och sekantmodulen $\mathbf{D}^s$ beskrivs enligt nedan

$$\mathbf{D}^s = \begin{bmatrix} \mu E & 0 & 0 \\ 0 & E & 0 \\ 0 & 0 & \beta G \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Termen μE beskriver töjningsuppmjuknandet i normalriktningen vid successiv uppsprickning, se Figur 4-7 a), och termen βG beskriver hur skjuvmotståndet reduceras vid successivt ökad uppsprickning, där β är skjuvmotståndsfaktor vilken reduceras t.ex. enligt Figur 4-7 b). En viktig aspekt med denna modell och skademodeller är att ingen plastisk töjning/deformation finns efter avlastning, dvs sprickor antas stängas fullständigt, [5].



Figur 4-7 a) Arbetskurva i enaxiell drag uttryckt i spänning töjning, b) Shear retention factor, [11]

Vid användandet av både fix och roterande sprickmetod finns risk att spänningslåsnig (stress-locking) uppstår, där strukturens styvhet överskattas efter sprickinitiering. Detta fenomen illustreras t.ex. av Rots (1986) och Malm (2009) där strukturens deformation p.g.a. detta underskattas signifikant.

Vid den roterande sprickmetoden finns även en risk för okontrollerad rotation av sprickriktning vilket leder till konvergensproblem eller att sprickan hittar ett roterat jämviktsläge vid fortsatt ökad belastning och på så sätt missar den verkliga brottmoden och därmed överskattar bärförmågan, se [11].

En stor fördel med brottmekaniska modeller är generellt att få materialegenskaper krävs för att definiera modellen, draghållfasthet och brottenergi, där dessa materialegenskaper som vanligen kan bestämmas enligt konventionella standarder/koder. För en fix sprick modell krävs även att en funktion för skjuvmotståndsfaktorn definieras som beskriver hur skjuvmotståndet i en spricka reduceras som funktion av spricköppning.

Skademodel

I skad modeller används en skadeparameter, d , som beskriver hur skadat ett element är, där 0 innebär att elementet är intakt och 1 innebär att elementet är fullständigt sprucket. De enklaste skad modeller baseras på en isotropisk skada. Detta innebär att när uppsprickning uppstår så kommer elementets styvhet att reduceras med faktorn $(1 - d)$ i samtliga riktningar och för både drag och tryckbelastning. Skadeparameters initiering styrs av ett brottvillkor, som beroende på val av skad modell kan t.ex. jämförelsetöjningen uppnår ett givet kriterium.

Detta är dock inte tillämpligt för simulering av betong p.g.a. den stora skillnaden i tryck- respektive draghållfasthet. För simulering av betongkonstruktioner krävs en mer avancerad metodik, där två separata skadeparametrar används, d_c och d_t som beskriver skadan orsakad av tryck respektive drag. Ett annat vanligt alternativ för betongkonstruktioner är att skad modeller endast används för att beskriva betongens beteende vid dragbelastning. I båda dessa fall används ett brottvillkor som t.ex. beskrivs av huvuddragtöjningen.

En skad modell med isotrop skadeparameter (i drag respektive tryck) motsvarar en roterande brottmekanisk sprickmodell i den bemärkelsen att strukturen förutsätts vara försvagad i huvudspänningens riktning oavsett hur sprickan/skadan uppstod. En fördel med en isotrop skad modell är att den är avsevärt enklare beräkningsmässigt än brottmekanisk modell.

Det finns även anisotropa skad modeller där skadeparametrar definieras i ortogonala riktningar vilket motsvarar en brottmekanisk modell baserad på ett fixt sprickplan.

En stor fördel med skad modeller, liksom brottmekaniska modeller, är generellt att få materialegenskaper krävs för att definiera modellen, draghållfasthet och brottenergi, där dessa materialegenskaper som vanligen kan bestämmas enligt konventionella standarder/koder.

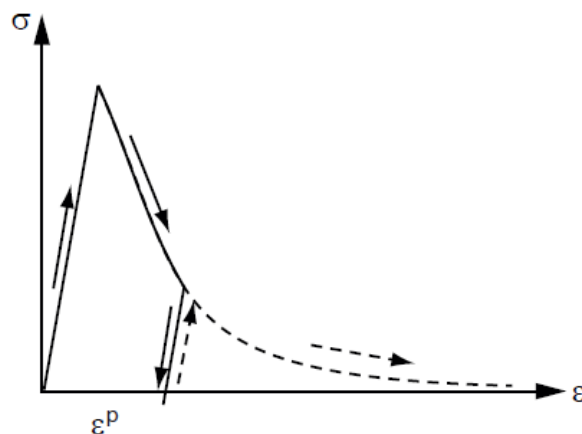
Plasticitetsteori

Plasticitetsteori används främst för att simulera segt materialbeteende, dock går det även och används ofta för att även beskriva kvasi-spröda material.

Inom plasticitetsteori kan töjningen delas upp i två termer, en för den elastiska töjningen och en plastisk töjning. Modeller baserade på plasticitetsteori har många likheter med skad modeller, t.ex. används ett flytvillkor (flytyta) inom plasticitetsteori som beskriver fleraxiella spänningstillstånd. Inom plasticitetsteori, beskriver denna flytyta dels när materialet slutar att agera linjärelastiskt och kommer att successivt ändra storlek eftersom den är beroende av dels aktuellt

spänningstillstånd men även av den tidigare plastiska deformationen som resultat av en hårdnandefunktion. Hårdnandefunktionen kan även beskriva ett uppmjuknande beteende, vilket innebär en reduktion av flytytan vilket t.ex. krävs för beskrivning av betongens reducerade styvhet i samband med uppsprickning.

En viktig skillnad mot skademodeller är att i plastiska materialmodeller uppstår en permanent plastisk töjning. Vid avlastning av en betongkropp efter sprickinitiering skulle avlastningen ske med samma lutning som elasticitetsmodulen, se Figur 4-8.



Figur 4-8 Elastisk avlastning med kvarstående plastisk töjning, [11].

Även om plasticitetsmodeller generellt går att definiera relativt enkla så är de oftast relativt komplicerade för användning av betongkonstruktioner. Vid iterationer krävs uppdatering av inre variabler vilket ej krävs i t.ex. skademodeller. Detta leder till att plasticitetsmodeller oftare är mer komplicerade att få konvergerande lösningar. Materialparametrar som ej kan anses vara konventionella för betong krävs vanligtvis, t.ex. dilationsvinkel som beskriver volymändring vid skjuvning.

Säkerhetsformat

För kontrollberäkning av dimensionerande bärförmåga med icke-linjär FEM samt ibland vid kontroll av deformationer bör även ett lämpligt säkerhetsformat väljas. Säkerhetsformatet ska då beakta osäkerheter av spridningen i materialens hållfasthetsvärden samt modellosäkerheter.

För att kontrollera deformationer och sprickbredder innehåller normer föreskrivna begränsningar i bruksgränstillstånd, t.ex. används vanligen karakteristiska materialhållfasthetsvärden för beräkningar. Vid val av betongens draghållfasthet bör då hänsyn också tas till eventuella egensprickor som kan ha uppkommit i massiva konstruktioner, som t.ex. krympsprickor. Ett vanligt sätt att beakta detta är att reducera den karakteristiska draghållfastheten i beräkningen med t.ex. faktorn 2.

För kontrollberäkning av dimensionerande bärförmåga med icke-linjär FEM i brottgränstillstånd, används vanligen två generella metoder i valet av säkerhetsformat:

- Partialkoefficientsmetoden där dimensionerande hållfasthetsvärden används, dvs hållfasthetsvärden reducerade med partialkoefficienter för materialspridning och modellosäkerhet.
- Globalsäkerhetsmetoden där medelhållfasthetsvärden används i den numeriska analysen och där analysens resulterande brottlastvärde delas med en global säkerhetsfaktor för att erhålla den dimensionerande brottkapaciteten. Den globala säkerhetsfaktor är då en produkt av en faktor för global materialspridning och en faktor för modellosäkerhet.

Den senare metoden med global säkerhetsfaktor är oftast att föredra då den ger en realistisk analys av brottmod som kommer att orsaka brott. För mer information och detaljer avseende säkerhetsformat vid icke-linjära FE-analyser hänvisas det här till Svenska Betongföreningens Betongrapport 15 [16] och fib Model Code 2010 [8].

4.2.2 Transportanalyser

Transportprocesser är av två huvudtyper, beroende på vilka storheter som ska beräknas:

- Stationära transportprocesser – flöden som ger fördelningar; beskrivs med flödesekvation och randvillkor.
- Icke-stationära transportprocesser – ändringar med tiden; beskrivs med mass- (energi-) balansekvation, flödesekvation(er), randvillkor och initialvillkor.

Kopplade processer kan antingen vara koppling mellan transportprocesser och mekaniska fenomen eller kopplingar mellan olika typer av transportprocesser. Exempel på det förra är fuktändringar som ger rörelser, spänningar och sprickbildning. Exempel på det senare är samtidig värme- och fukttransport, ång-/gas- och vätsketransport, transport av fukt och lösta ämnen etc.

Det finns flera olika typer av modeller för att simulera fukttransport i betongkonstruktioner, beroende på vilka fysikaliska fenomen som ska beskrivas och val av modellens komplexitet. Vanligtvis beskrivs fukttransporten som ett diffusionsfenomen som styrs av Fick's lag eller alternativt genom att anse betongen som ett poröst medium i vilken fukttransporten sker genom kapillärtransport som styrs av en portrycksgradient via Darcy's lag. I vissa fall måste dessa beskrivningssätt kombineras, t ex om fukttransport sker under en temperaturgradient. Om fukttransport transporterar lösta ämnen konvektivt måste den totala fukttransporten delas upp i en del som kan transportera joner och en del som inte kan det. Alla fukttransportegenskaper är starkt icke-linjära.

Icke-stationära modeller för fukttransport måste innehålla en beskrivning av den fysikaliska fuktbindningen, som ett samband mellan fukttransportpotentialen och det totala fukttinnehållet. Detta samband kan ges som en enkel bindningskapacitet, fuktkapacitet, eller som ett fuktberoende, icke-linjärt samband, dvs med en sorptionskurva. Om fuktvariationer ska beskrivas måste sorptionskurvor av typen

skanningkurvor (övergångskurvor då fuktändringen byter tecken) ingå i modellen. Alla dessa jämviktssamband är temperaturberoende.

I tidigt skede påverkas en stor del av fuktbalansen i betong av den kemiska bindningen av vatten till cementet, s.k. självuttorkning. Beskrivning av dessa kemiska reaktioner inkluderar starka temperatur- och fuktberoenden. De kemiska reaktionerna ger också upphov till värmeutveckling som måste ingå i energibalansen för beskrivning av betongtemperaturer i tidiga skeden.

Modeller för värmetransport – strålning, konvektion, värmeledning – kräver på samma sätt en flödesbeskrivning, som regel med temperaturen som transportpotential. Värmekonduktiviteten och värmekapaciteten beskrivs i de enklaste modellerna som konstanter men i mer komplicerade fall behöver temperatur- och fuktberoenden inkluderas, t ex vid frysning, tjälbildning och uttorkning. Fasomvandlingen ånga/vätska innehåller en energidel som oftast är försumbar för betong.

Modeller för transport av gaser är av helt olika slag om de beskriver diffusion av en gas, som t ex vid karbonatisering, eller beskriver gastransport under totaltrycksgradienter. I det senare fallet bör en massbalansekvation användas, med gasflödet som ett massflöde och inte ett volymflöde eftersom gasvolymen hela tiden ändras med gastrycket. Beskrivning av icke-stationär gastransport under totaltrycksgradienter måste också inkludera en "bindningsbeskrivning" som inte bara är tillgänglig porvolym utan också den gas som kan lösas i porvattnet i betong.

Modeller för transport av vatten/vätskor i betong beskriver ett vattenflöde med vatten som en inkompressibel vätska med vattentrycket som transportpotential. Initialvillkoren är ett porsystem som bara delvis är fyllt med vatten pga. den självuttorkning som sker i takt med cementreaktionerna. I täta betonger kan det ta år eller decennier att fylla detta delvis tömda porsystem på några cm:s djup i betong som ständigt står under vatten. Luftporsystemet tar ännu längre tid att fyllas eftersom det kräver att den instängda luftens molekyler löses upp i porvattnet och diffunderar iväg till ränder eller andra luftporer. Transportmodeller för vatten måste beakta dessa förhållanden och initialvillkor.

Modeller för transport av lösta ämnen kan vara rent empiriska, med parametrar som kvantifierats från ett stort dataunderlag, eller "fysikaliska" som innehåller beskrivningar av flödena av lösta ämnen och deras fysikaliska och kemiska interaktion med porsystem och diverse bundna kemiska föreningar. Flödesbeskrivningarna inkluderar dels en diffusiv del och dels en konvektiv del. Båda delarna är starkt fuktberoende och i viss mån koncentrationsberoende.

Den fysikalisk/kemiska interaktionen mellan lösta och bundna ämnen kan beskrivas med olika komplikationsgrad. Den enklaste är användningen av en konstant bindningskapacitet eller en icke-linjär, koncentrationsberoende bindningsisoterm. De mer sofistikerade beskrivningssätten innehåller jämviktssamband mellan alla ingående ämnen och deras föreningar.

Urlakning av ämnen från betong i vatten är ett bra exempel på denna typ av transportprocesser där själva transportprocessen modelleras som en ren

diffusionsprocess av de ämnen (K^+ , Na^+ , OH^- , Ca^{++} m fl) som lakas ur. De bundna ämnena måste modelleras som "källor" med en fysikalisk/kemisk interaktion med de lösta ämnena. Urlakningsprocessen öppnar upp porsystemet så att denna ökning av transportvägarna måste modelleras som funktion av urlakningsgraden.

Ovanstående beskrivningar av modeller för beräkning av transportprocesser kan matematiskt uttryckas på följande sätt, jfr Bilaga 4.1.

Energi- och massbalans

Alla beräkningar av icke-stationära transportprocesser utgår från en eller flera, eventuellt kopplade, mass- eller energibalanskvationer. Sådana kan generellt uttryckas, i en dimension, med Ekvation 4.3

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = - \frac{\partial J(x,t)}{\partial x} \quad (4.3)$$

där C är totalinnehållet av det transporterade "ämnet", ofta i kg (eller mol) per volymenhet material [m^3_{mtrl}], och J är flödestätheten ("flödet") av ämnet, som regel i kg (eller mol) per ytenhet material [m^2_{mtrl}] och tidsenhet [s].

Det är viktigt att C här är totalinnehållet och att det anges per volymenhet material och inte t ex volymenhet porer eller porvätska. På samma sätt är det viktigt att flödet J beskrivs per total ytenhet material och inte t ex ytenhet porer eller porvätska (för lösta ämnen). Att dessa dimensioner anges korrekt är helt avgörande för fortsättningen; annars kan lätt fel på en tiopotens uppkomma.

Exempel på "totalinnehåll" i modeller för transportprocesser ges i Tabell 4-1.

Tabell 4-1: Exempel på storheter i massbalanskvationer

Transportprocess	Totalinnehåll " C "	Transporterat "ämne"	Kommentar
Temperaturändringar	Energi* [J/m^3_{mtrl}]	Värme [$W/(m^2_{mtrl}s)$]	*inkl. energi vid ev. fasomvandling
Fuktändringar, t ex uttorkning, uppfuktning	Vatten ¹ [kg/m^3_{mtrl}]	Fukt och vatten [$kg/(m^2_{mtrl}s)$]	¹ Fysikalisk och kemiskt bundet
Koncentrationsändringar, allmänt, t ex inträngning, urlakning	Totalmängd ² [kg/m^3_{mtrl}]	Löst ämne (joner), "diffusivt" och konvektivt [$kg/(m^2_{mtrl}s)$]	² Löst i porvätska och bundet till porväggar och fast material
Karbonatisering	$CO_3(+CO_2)$ [kg/m^3_{mtrl}]	Gas [$kg/(m^2_{mtrl}s)$]	Gasdiffusion + reaktion/bindning
Vatten under tryck	Vatten ¹ [kg/m^3_{mtrl}]	Fukt och vatten [$kg/(m^2_{mtrl}s)$]	
Gas under tryck	Gas [kg/m^3_{mtrl}]	Gas [$kg/(m^2_{mtrl}s)$]	Inkl. lösning av gas i porvatten

I många avancerade modeller beskrivs delflöden i porsystemet eller i porvätskan. Det är då viktigt att sådan beskrivningssätt utmynnar i en korrekt övergripande massbalans enligt ovan. Detta måste klargöras i beräkningsförutsättningarna.

Det vänstra ledet i Ekvation 4.3 delas ofta upp i två delar; en del som beskriver innehållet/koncentrationen av det transporterade ämnet och en del som beskriver det som är bundet och inte kan transporteras.

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial c(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial c_B(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial c(x,t)}{\partial t} + Q \quad (4.4)$$

där c är koncentrationen av det transporterade ämnet [$\text{kg}/\text{m}^3_{\text{mtrl}}$] och c_B är koncentrationen av den bundna delen av ämnet [$\text{kg}/\text{m}^3_{\text{mtrl}}$]. Den andra termen beskrivs ofta som en "källterm" Q [$\text{kg}/(\text{m}^3_{\text{mtrl}}\text{s})$] som ändrar totalinnehållet utan någon transport.

Exempel på "källtermer" i modeller för transportprocesser ges i Tabell 4-2.

Tabell 4-2: Exempel på storheter i tvådelade massbalansekvationer

Transportprocess	Totalinnehåll " C "	Koncentration " c " av transporterat "ämne"	Koncentration " c_B " av bundet "ämne"
Temperaturändringar	Energi [$\text{J}/\text{m}^3_{\text{mtrl}}$]	Värmeinhåll $\rho c \theta$ [$\text{J}/(\text{m}^3)$]	Fasomvandlingsvärme [$\text{J}/(\text{m}^3)$]
Fuktändringar, t ex uttorkning, uppfuktning	Vatten [$\text{kg}/\text{m}^3_{\text{mtrl}}$]	Fukthalt [$\text{kg}/\text{m}^3_{\text{mtrl}}$]	Kemiskt bundet vatten [$\text{kg}/\text{m}^3_{\text{mtrl}}$]
Koncentrationsändringar, allmänt, t ex inträngning, urlakning	Totalmängd [$\text{kg}/\text{m}^3_{\text{mtrl}}$]	Koncentration av löst ämne [$\text{kg}/\text{m}^3_{\text{mtrl}}$]	Mängd bundet ämne [$\text{kg}/\text{m}^3_{\text{mtrl}}$]
Karbonatisering	$\text{CO}_3(+\text{CO}_2)$ [$\text{kg}/\text{m}^3_{\text{mtrl}}$]	Gas [$\text{kg}/(\text{m}^2_{\text{mtrl}}\text{s})$]	Gasdiffusion + reaktion/bindning
Vatten under tryck	Vatten ¹ [$\text{kg}/\text{m}^3_{\text{mtrl}}$]	Fukt och vatten [$\text{kg}/(\text{m}^2_{\text{mtrl}}\text{s})$]	
Gas under tryck	Gas [$\text{kg}/\text{m}^3_{\text{mtrl}}$]	Gas [$\text{kg}/(\text{m}^2_{\text{mtrl}}\text{s})$]	Inkl. lösning av gas i porvatten

Ett annat sätt att beskriva det vänstra ledet är att inkludera en "lagringskapacitet" $dC/d\psi$ i kombination med en transportpotential ψ , se ekvation 4.5.

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial C}{\partial \psi} \cdot \frac{\partial \psi(x,t)}{\partial t} \quad (4.5)$$

Lagringskapaciteten beskrivs närmre i avsnitt "Lagringskapacitet –" nedan.

Flödesbeskrivningar

Beräkningar av stationära transportprocesser baseras på en beskrivning av flödestätheten ("flödet") och samma flödesbeskrivning är en väsentlig del av varje massbalansekvation, enligt Ekvation 4.3.

En sådan flödesekvation kan generellt skrivas, i en dimension, med en ekvation av typen Ekvation 4.6.

$$J(x,t) = -k_{\psi} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial x} + J_{\text{fluid}} \cdot c'(x) \quad (4.6)$$

där den första termen beskriver ett potentialflöde med ψ som transportpotential och k_ψ som transportkoefficient. Transportkoefficienten k_ψ är som regel starkt icke-linjär och beroende av ett antal parametrar utöver transportpotentialen ψ .

Naturligtvis kan flera liknande termer användas för potentialflöden som påverkas av flera potentialer. Några exempel på transportprocesser där flera potentialer ofta används är

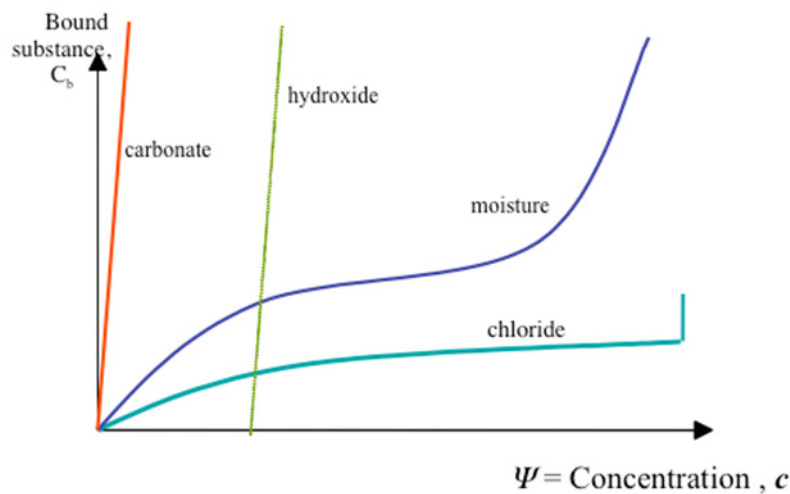
- Fuktttransport: fukthalt och ånghalt, RF och ånghalt, porvattentryck och ånghalt eller fukthalt och temperatur.
- Transport av joner: koncentration, elektrisk potential och jonaktivitet som alternativ till bara koncentration (med Fick's 1:a lag).

Den andra termen i (4.6) beskriver ett konvektivt flöde av ämnet som har koncentrationen $c'(x)$ i den "fluid" som transporteras samtidigt som potentialflödet av ämnet. Med beteckningen c' för koncentrationen menas att den anges som koncentration [$\text{kg}/\text{m}^3_{\text{fluid}}$] i den fluid som ämnet transporteras med, t ex en gas eller en vätska. Flödet J'_{fluid} beskrivs då som ett volymflöde i [$\text{m}^3_{\text{fluid}}/\text{m}^2_{\text{mtrlS}}$] för att dimensionen hos $J'_{\text{fluid}} \cdot c'$ ska bli [$\text{kg}/\text{m}^2_{\text{mtrlS}}$]. Volymflödet J'_{fluid} [$\text{m}^3_{\text{fluid}}/\text{m}^2_{\text{mtrlS}}$] beskrivs ofta som en "hastighet" u [m/s], eftersom dimensionen [$\text{m}^3_{\text{fluid}}/\text{m}^2_{\text{mtrlS}}$] skulle kunna "förkortas" till [m/s], men det ställer stora krav på att man säkerställer att dimensionerna blir korrekta.

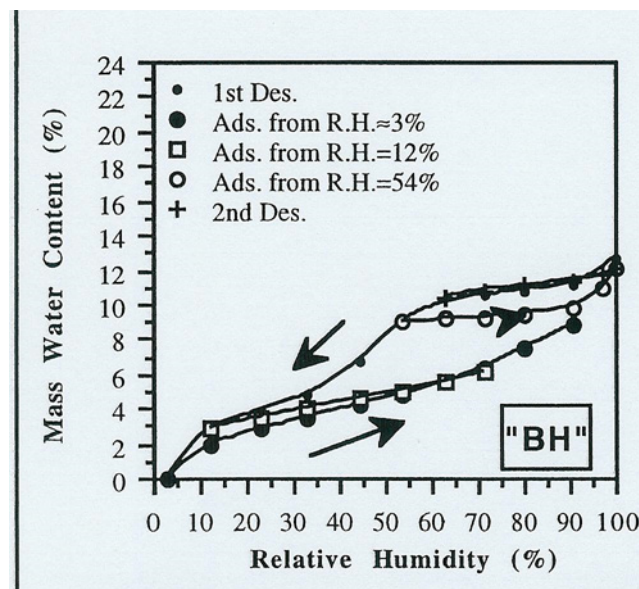
Lagringskapacitet – interaktion mellan transporterat ämne och materialet

I de flesta transportprocesser sker en interaktion/bindning av det eller de transporterade ämnena med/till det fasta materialet. I sådana fall används endera av Ekvation 4.4 och 4.5 som vänstra ledet i massbalansekvationen. Ändringen av totalinnehållet C måste antingen successivt delas upp i nya värden på c och c_B eller måste ett nytt värde på transportpotentialen ψ beräknas med hjälp av lagringskapaciteten $dC/d\psi$.

Några exempel på lagringsfunktioner i transportprocesser ges i Figur 4-9 och Figur 4-10. "Lagringskapaciteten" $dC/d\psi$ vid ett visst värde på transportpotentialen ψ är lutningen hos respektive kurva vid det värdet. För vissa transportprocesser kan denna approximeras med en konstant, åtminstone i vissa intervall. För andra krävs ett icke-linjärt samband. Ibland, som i Figur 4-10, är lagringskapaciteten också beroende av historiken, i exemplet av fukthistorien.



Figur 4-9 Några exempel på enkla lagringsfunktioner i transportprocesser [12]



Figur 4-10: Exempel på historikberoende lagringsfunktion i fukttransportprocesser, [1]

Beskrivningen av lagringskapaciteten, sambandet mellan C eller C_B och ψ , kan göras på många olika sätt beroende på vilka approximationer som är acceptabla och vilka parametrar man måste ta hänsyn till. Den enklaste formen är ett konstant värde på "bindningskapaciteten", som till exempel en värmekapacitet eller en fuktkapacitet. Den senare innebär då att kurvan i Figur 4-9 approximeras med en rät linje. Detta duger inte för mer avancerade beräkningar av transportprocesser.

Fick's andra lag

En ofta använd modell för transportprocesser är "Fick's 2:a lag", ibland kallad "värmeledningsekvationen". Den baseras på mass- eller energibalanssekvationen

med lagringskapacitet avsnitt "Lagringskapacitet- " ovan, och en flödesbeskrivning med ett potentialflöde enligt Ekvation 4.6 utan den konvektiva termen. Används dessa båda ekvationer erhålls följande

$$\frac{\partial C}{\partial \psi} \cdot \frac{\partial \psi(x, t)}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \left(-k_{\psi} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) \quad (4.7)$$

som kan skrivas om till

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k_{\psi}}{\frac{\partial C}{\partial \psi}} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} D \cdot \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (4.8)$$

eller, om diffusiviteten D antas konstant

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \quad (4.9)$$

Detta är Fick's 2:a lag som bland annat används som modell för enklare beräkningar av temperaturändringar ($\psi=T$), fuktändringar/uttorkning ($\psi=w$) och inträngning av klorider ($\psi=C$ eller c). Den duger inte för mer avancerade beräkningar eftersom varken transportkoefficienten k_{ψ} eller lagringskapaciteten $dC/d\psi$ är konstanter.

Diffusiviteten D [m^2/s] i Fick's andra lag får inte förväxlas med diffusionskoefficienten D_c [m^2/s] i Fick's första lag! De har ofta samma dimension, har ofta beteckningen D och är ofta av samma storleksordning (inom en eller två tiopotenser).

4.3 BERÄKNINGSVERKTYG:

Det finns en uppsjö av programvaror för att genomföra numeriska analyser av betongkonstruktioner, oavsett om det syftar till att genomföra mekaniska eller transportanalyser. I detta kapitel sammanfattas olika typer av programvaror som kan användas för mekanisk- eller transportanalys hos betong. Syftet med detta avsnitt är inte att jämföra olika programvaror eller redogöra för deras styrkor och eller svagheter. Istället ges en generell beskrivning av olika typer av kommersiella programvaror som kan klassificeras inom kategorierna

- Programvaror för konventionell dimensionering
- Specialutvecklade programvaror
- Generella (multi-fysik) FE programvaror

I detta avsnitt ges en översiktlig presentation av vanligt förekommande kommersiella programvaror som används för att genomföra dessa typer av analyser. Observera att det endast är programvaror som är tillgängliga för branschen i stort (via köp eller som fri programvara) som beskrivs.

Specialutvecklade programvaror som endast enstaka individer eller organisationer har tillgång till, är ej inkluderade. Denna lista ska inte på något sätt betraktas som heltäckande.

Naturligtvis finns det även en uppsjö av egenutvecklade programvaror, dessa kräver dock avsevärt mycket högre grad av verifiering jämfört mot kommersiella programvaror. Observera att detta även gäller fri tillgänglig programvara (freeware). Kommersiella programvaror kontrolleras kontinuerligt samt uppdateras löpande. Dessa ska även visa att det klarar att räkna korrekt på flera olika sorters av förenklade standardiserade problemformuleringar, så kallade patchtester för att verifiera elementtyper, materialmodeller, ekvationslösare etc. Självfallet måste dock användaren själv verifiera sina egna beräkningar även om en kommersiell programvara används eftersom ett fel vid indata eller feltolkning av programvarans funktion kan leda till signifikanta felskattningar. Verifiering av beräkningsverktyg för beskrivs i kapitel 8.

4.3.1 Programvaror avsedda för konventionell dimensionering

Inom denna kategori finns väldigt många olika programvaror, dock ligger detta område något utanför fokus för denna rapport som syftar till avancerade beräkningar och därmed beskrivs programvaror mycket kortfattat.

Denna typ av programvara används huvudsakligen som ett verktyg inom dagligt dimensioneringsarbete. Syftet med denna typ av programvara är att det ska vara användarvänlig och där olika normer finns direkt inkorporerade för att utvärdering ska kunna genomföras i enlighet med dessa. I denna typ av programvara saknas generellt möjligheten att genomföra kopplade analyser (åtminstone inte i programvara inriktad på mekaniska analyser) utan istället genomförs beräkningar där effekter så som krympning baseras på t.ex. uttryck enligt diverse normer.

Mekaniska analyser

I dessa typer av analyser är ofta fokus på bestämning av tvärsnittskrafter som sedan tillämpas används för tvärsnittsdimensionering enligt med vald standard och/eller norm. Syftet med programvaror avsedda för konventionell dimensionering är så ledes inte (primärt) att kunna genomföra analyser som beaktar icke-linjära fenomen så som uppsprickning. Vissa av programvarorna som ges som exempel nedan har dock denna möjlighet. Dock är det mest vanligt att istället för att simulera uppsprickning, istället påvisas t.ex. endast en sprickrisk där en utnyttjandefaktor illustrerar områden som utsätts för påkänningar som överskrider hållfastheten. Exempel på programvaror avsedda för dimensionering av betongkonstruktioner:

- Brigade Standard
- FEM-Design
- Robot Millenium
- etc.

Transportanalyser

I dessa typer av analyser, genomförs vanligen beräkningar i syfte att analysera sprickrisk i ung betong och eller uttorkningsberäkningar på betongkonstruktioner. Syftet med denna typ av analyser är ofta att bestämma tillvägagångssätt vid gjutning, så som; när kan betongen avformas, behövs kylning etc.

Exempel på programvaror för temperaturanalyser:

- ConTest Pro
- HACON-S
- PPB (värmeutveckling och värmetransport i ung betong; 1D & 2D)
- etc.

Exempel på programvaror för fukt- och uttorkningsberäkningar:

- WUFI och WUFI-2D (Fukttransportbeskrivning med ångtryck och fukthalt som transportpotentialer; en enkel sorptionskurva. Avancerade randvillkor i form av naturligt klimat som också inkluderar strålning och regn)
- etc.

4.3.2 Specialutvecklad programvara*Mekaniska analyser*

Det finns även programvaror som är utvecklade för icke-linjära analyser avseende uppsprickning. I denna typ av programvaror går det dock ofta inte att analysera komplicerade konstruktioner, utan programvaran baseras på utvärdering av olika typer av balktvärsnitt etc. Exempel på programvaror för icke-linjär tvärsnittsanalys av betongkonstruktioner

- Response – 2000
- Membrane – 2000
- etc.

Denna typ av programvaror för förenklade icke-linjära beräkningar används dock med försiktighet och på egen risk vid dimensionering enligt programutvecklaren. Den lämpar sig därför mer för kontrollberäkningar av mer avancerade beräkningsverktyg och eller som en förenklad uppskattning av t.ex. bärförmåga vid brott då icke-linjära materialegenskaper beaktas.

En annan typ av specialiserad programvara för mekaniska analyser särskilt inriktad mot betongdammar är CADAM (Computer Analysis of Dams), som är ett gratisprogram, via <http://www.struc.polymtl.ca/cadam/>. Detta program är avsett för stabilitetsberäkningar och jordbävningsanalyser (inklusive tillskott från dynamiskt vattentryck).

Transportanalyser

Följande två program är specialutvecklade för fuktberäkningar:

- KFX: 1D med fuktflödesekvation med ånghalt som potential
- VaDau: 2D med fuktflödesekvation med ånghalt/porvattentryck som potentialer

KFX beräknar en-dimensionella fuktfördelningar icke-stationärt genom att med finitadifferensmetod, numeriskt lösa massbalansekvationen för fukt och stationärt beräkna temperaturfördelningen i varje tidssteg. Beräkningarna görs i Excelblad med hjälp av makron och Visual Basic. Indata kan anges fuktberoende och olika alternativ att ange randvillkor har inarbetats. Fukttransportkoefficienten δ anges som fuktberoende, dvs ökande med ökande RF. Fuktmotståndet Z hos ett skikt anges som konstant.

VaDau bygger på finita framåtberäkning i två dimensioner. Fukttransporten beräknas med en term för diffusion och en term för vätsketransport. I programmet kan materialegenskaperna väljas fuktberoende. VaDau innehåller för närvarande tre olika beräkningsmodeller:

- DDX: Generella flödesberäkningar med konstanta koefficienter för en typ av flöde, t.ex. fukt eller värme.
- DDXCC: Beräkning av hydrations-, temperatur- och hållfasthetsutveckling i betong.
- DDXRT: Temperatur- och fukttransportberäkningar i hygroskopiska material beroende av relativfuktighet och temperatur samt med fuktberoende transportkoefficienter.

4.3.3 Generella (multi-fysik) FE programvaror

I de flesta generella multi-fysikprogramvaror finns det en möjlighet att genomföra både transportanalyser och mekaniska analyser. Här finns även möjlighet att bestämma hur dessa analyser ska kopplas, om en ömsesidig interaktion ska finnas mellan olika obekanta storheter eller om det räcker med en envägskoppling så att en storhet påverkar en annan men ej vice versa.

- Exempel på fall där ömsesidig interaktion krävs är vid analys av fukt och temperatur, där temperaturen påverkar fukttransporten och vice versa.
- Motsvarande exempel på ensidig interaktion är kopplingen mellan temperatur och deformation, där för normala fall påverkar temperaturen en strukturs deformation men ej vice versa.

I generella multi-fysikprogramvaror finns inbyggda moduler för numeriska beräkningar av t.ex. transportfenomen eller mekaniska beräkningar och där olika analyserade fenomen går att beakta parallellt eller att det sker via så kallade co-simulations där analyserna genomförs sekventiellt och successivt ger indata till respektive analys. I de flesta multi-fysikprogramvaror går det även att definiera egna beräkningsrutiner och/eller egna materialdefinitioner för icke-linjära beteenden.

Generellt går det att genomföra motsvarande analyser i samtliga multi-fysikprogramvaror, dock kan det krävas olika mycket arbetsinsats av användaren för att genomföra beräkningen eller kräva olika typer av förenklingar och antaganden.

De programvaror som är fokuserade mot betongkonstruktioner har i många fall skräddarsytt tillämpningen för att förenkla för användaren vid t.ex. kopplade processer, så som ung betong t.ex. I denna typ av programvaror finns det ofta även föreslagna materialegenskaper och materialkurvor för att ytterligare stödja användaren. Dessa tillämpningar baseras vanligtvis på generella riktlinjer från standarder och guidelines så som t.ex. Model Code 2010 [8]. Detta kan dock innebära att användaren blir begränsad av de fördefinierade beteenden som har definierats av programtillverkaren.

Exempel på programvaror inriktade mot betongkonstruktioner, där kopplade processer kan genomföras genom fördefinierade funktioner från programtillverkaren:

- Atena
- Brigade Plus
- Diana
- Lusas
- etc

I andra typer av beräkningsverktyg så som generella multi-fysikprogramvaror är det oftast upp till användaren själv att beskriva dels själva materialbeteendet men även hur interaktionen mellan olika parametrar ska ske. I många fall finns processer definierade, så som t.ex. materialmodeller för simulering av uppsprickning eller t.ex. analysmetoder baserade på Fick's lag redan definierade. I de fall då användaren önskar modifiering av befintliga analysmetoder och/eller materialmodeller går det att definiera egna. I de flesta programvaror genomförs detta genom definition av "user subroutines/user coded subroutines", t.ex. i Abaqus, Adina och Ansys. I dessa fall sker definitionen av dessa egenutvecklade rutiner med hjälp av ett generellt programmeringsspråk så som FORTRAN. I t.ex. FE-programmet Comsol är det inbyggt att användaren själv, direkt i användargränssnittet, kan definiera egna differentialekvationer för att beskriva fenomen, materialmodeller, etc.

Exempel på programvaror inriktade mot multi-fysik ges nedan

- Abaqus
- Adina
- Altair Smart Multiphysics
- Ansys
- Atena Science
- Comsol Multiphysics
- Code Aster
- MSC Nastran
- etc.

Bilaga 4.5 visar exempel på beräkningar för vattenkraftskonstruktioner.

4.4 BERÄKNINGARNAS SYFTE, DIGNITET OCH OMFATTNING

Beräkningarna kan syfta till en eller flera av följande punkter:

- undersöka, ge förklaring och ökad allmän kunskap om inverkan av olika mekaniska och fysikaliska fenomen på konstruktioner och material
- underlag för illustrationer, publika informationer och marknadsföring
- underlag för beslut där beräkningsresultat skall vara så nära verkligheten som möjligt
- underlag för dimensionering där beräkningsresultat "på säkra sidan" är tillfylles
- analysera resultat av skadeutredningar, övervaknings- och tillståndsbedömningsdata

Med hänsyn till beräkningarnas konsekvenser kan beräkningar indelas enligt nedan:

- beräkningar av låg dignitet (liten kostnad och liten risk för personskada om fel i beräkningen)
- beräkningar av hög dignitet (stor kostnad och liten risk för personskador om fel i beräkningen)
- beräkningar av synnerligen hög dignitet (stor kostnad och stor risk för personskador om fel i beräkningen)

Beräkningarnas omfattning styrs av deras syfte, dignitet, typ av uppdrag, typ av problemställning och krav på kompetens. Beräkningsuppdragen kan indelas enligt nedan:

- enskilt begränsat och specifikt beräkningsuppdrag som genomförs i sin helhet före redovisning
- större beräkningsuppdrag över längre tid

Problemställningen och krav på kompetens kan påverka val av beräkningsmodell som i sin tur påverkar beräkningars omfattning. Beräkningsmodellerna kan grovt indelas enligt nedan:

- Linjära (kopplade och icke kopplade) analyser av icke bärande system
- Linjära (kopplade och icke kopplade) analyser av bärande system
- Icke linjära (kopplade och icke kopplade) analyser av bärande och icke bärande system

5 Steg i granskningsprocessen

5.1 INLEDNING

För att uppnå god kvalitet inte bara i beräkningsresultaten utan även i granskningen av beräkningsresultaten krävs det att granskningsprocessen planeras. Det är också viktigt att granskningsprocessen är överenskommen mellan parterna, dvs Beställaren, Beräkningsingenjören och Granskaren.

Vidare måste granskningsprocessen planeras tidigt i projektet och innan beräkningsarbetet påbörjas. För att granskningen ska vara så effektiv som möjligt rekommenderas det här att Granskaren utses redan innan beräkningsarbetet påbörjas. I ett tidigt skede bör Beräkningsingenjören och Granskaren vara överens om Analysförutsättningarna.

I nästa avsnitt beskrivs ett förslag på hur granskningsprocessen kan planeras för att erhålla en effektiv granskning med god kvalitet. Givetvis förutsätter det att Granskarens kompetens är adekvat och att granskningsarbetet bedrivs objektivt och sakligt.

5.2 PROCESSEN

I det följande beskrivs granskningsprocessen steg för steg.

- Steg 1: Beställaren formulerar beräkningsuppdraget, dess syfte, mål och avgränsningar samt utser en Utförare av beräkningarna och en Granskare. Gränsdragningar mellan eventuella parallella konstruktions- och/eller beräkningsobjekt och/eller projekt tydliggörs enligt dokumenterad överenskommelse mellan Beställaren och Beräkningsingenjören.
- Steg 2: Tidplan upprättas enligt överenskommelse mellan Beställaren, Beräkningsingenjören och Granskare. Nedanstående process beaktas i tidsplanen.
- Steg 3: Beräkningsingenjören upprättar och redovisar ett dokument kallad Analysförutsättningar, se avsnitt 6.3.
- Steg 4: Granskaren granskar Analysförutsättningar och lämnar synpunkter skriftligt i ett granskningsutlåtande.
- Steg 5: Beräkningsingenjören besvarar skriftligen granskningssynpunkterna.
- Steg 6: Granskningsmöte 1 mellan Beräkningsingenjören och Granskaren (med eventuell närvaro av Beställaren) där granskningssynpunkterna och svaren från stegen 4 och 5 går igenom och justeringar av Analysförutsättningar överenskomms.
- Steg 7: Beräkningsingenjören reviderar Analysförutsättningar som sänds till Granskaren.

- Steg 8: Granskaren granskar justeringarna i Analysförutsättningarna och skickar en skriftlig bekräftelse avseende godkännande av dokumentet. Om dokumentet inte kan godkännas, upprepas stegen 4, 5 och 7. Ytterligare granskningsmöte enligt steg 6 genomförs endast om behov föreligger och det påtalas av endera part eller Beställaren.
- Steg 9: Beräkningsingenjören genomför beräkningen och upprättar samt redovisar en Analysrapport, se avsnitt 6.4.
- Steg 10: Granskaren granskar Analysrapporten och lämnar synpunkter skriftligt i ett granskningsutlåtande.
- Steg 11: Beräkningsingenjören besvarar skriftligen granskningssynpunkterna.
- Steg 12: Granskningsmöte 2 mellan Beräkningsingenjören och Granskaren (med eventuell närvaro av Beställaren) där granskningssynpunkterna och svaren från stegen 10 och 11 går igenom och justeringar av Analysrapporten överenskomms.
- Steg 13: Beräkningsingenjören reviderar Analysrapporten (efter förnyad beräkning om så krävs) som sänds till Granskaren.
- Steg 14: Granskaren granskar justeringarna i Analysrapporten och skickar en skriftlig bekräftelse avseende godkännande av dokumentet. Om dokumentet inte kan godkännas, upprepas stegen 10, 11 och 13. Ytterligare granskningsmöte enligt steg 12 genomförs endast om behov föreligger och det påtalas av endera part eller Beställaren.

Vid oenighet:

Om enighet om resultatens riktighet och/eller om innehållet i Analysförutsättningar och/eller i Analysrapporten råder, upprättar vardera part varsitt dokument där ståndpunkter och motiveringar redogörs. Dokumenten lämnas till Beställaren som beslutar om vidare åtgärder, t.ex. anlitan av s.k. second opinion.

Förenklad process:

Om beräkningen är av enklare natur eller om omfattningen är begränsad, kan och bör den här ovan föreslagna processen förenklas på lämpligt sätt. T.ex. kan stegen för granskning av dokumenten Analysförutsättningar och Analysrapporten slås ihop till ett moment och även ett dokument i de enklare fallen. Antalet granskningsmöten kan därmed också begränsas till ett möte om konsensus kan uppnås vid det mötet. De principiella beräkningsförutsättningarna bör dock vara överenskomna före det att beräkningsarbetet påbörjas.

6 Dokument

6.1 INTRODUKTION

I kapitel 5 redovisas hur en kvalificerad granskningsprocess kan genomföras. Centralt i denna process är följande två viktiga dokument som upprättas i olika skeden

- **Analysförutsättningar** som skall upprättas innan själva analyserna genomförs
- **Analysrapport** som skall upprättas efter att analyserna genomförts och där resultat och slutsatser redovisas

I detta kapitel utvecklas mer i detalj vilka krav som ställs på dessa dokument så att de blir granskningsbara. En mycket viktig del i dokumentationen är

- Redovisning av analysmodell och indata

Vad som bör ingå i denna del beskrivs detaljerat i avsnitt 6.2.

6.2 REDOVISNING AV ANALYSMODELL OCH INDATA

Denna del är central som underlag för såväl granskning som tolkning av resultat och skall innehålla följande delar

1. Beskrivning av den verkliga problemställning som ska analyseras med beräkningar. Hur kan denna problemställning belysas eller beskrivas med vald (matematisk) analysmodell? Vilka begränsningar i förhållande till den verkliga problemställningen kan förväntas finnas i analysmodellen? Den principiella beskrivningen av själva analysmodellen är viktig. Vid strukturmekaniska analyser skall man t.ex. beskriva om modellen är linjär eller olinjär. I det senare fallet skall val av konstitutiv modell och eventuellt beaktande av geometrisk olinjäritet beskrivas. I beskrivningen av modeller för transportberäkningar skall t.ex. massbalansbeskrivning och flödesbeskrivningar definieras och liksom ingående parametrar och deras dimensioner.
2. Beskrivning av yttre påverkningar på det system som skall analyseras (t.ex. mekaniska laster, påtvingade deformationer, fuktbelastningar, termiska laster, flöden, klimatförutsättningar m.m.). Vilken information och vilka källor ligger till grund för vald beskrivning av dessa?
3. Systemavgränsning och randvillkor som väljs för det system som skall analyseras. Hur har den del som ingår i själva modellen avgränsats i relation till omgivande delar? Randvillkor används för att beskriva hur det system som analyseras interagerar med omgivningen. För konstruktionsberäkningar gäller detta t.ex. typ av upplag, utnyttjade symmetrier, föreskrivna förskjutningar, friktionsförhållanden, grad av tvång, etc. För transport- och flödesberäkningar avses t.ex. villkor för mass- och energiflöden eller föreskrivna fukt- och/eller temperaturtillstånd vid systemets begränsningsytor.
4. Förenklingar och antaganden som görs i datorbaserade numeriska modeller. För t.ex. prefabricerade konstruktionssystem kan det handla om vilka villkor för interaktion mellan fysiska element som antas i modellen (momentstyva eller ledade kopplingar, approximation med fjädrar, friktionsvillkor etc.).
5. Redovisning av val av materialparametrar som används som indata i modellen och referens till varifrån data hämtats. För konstruktionsanalyser handlar det

om styvheter, hållfastheter, parametrar i konstitutiva samband vid icke-linjära analyser, friktionsvärden etc. Vid verifiering av säkerhet och funktion baserad på normer finns vanligen värden på materialparametrar föreskrivna i respektive norm, men antaganden utanför eller utöver vad som föreskrivs skall redovisas. Vid andra typer av analyser handlar det t.ex. om värme- och fukttransportegenskaper i material, beskrivning av värme- och fuktlagring i material samt densitet.

Sammanfattande redovisning av osäkerheter i analysmodell och ingångsdata som man har tillgång till. Här avses en systematisk redovisning och preliminär värdering av möjliga viktiga avvikelser mellan den analysmodell och indata som avses användas och det verkliga problem som skall analyseras i projektet. Genomgången av osäkerheter skall omfatta samtliga delar i kedjan beskrivna i punkterna 1-5 ovan.

6.3 DOKUMENTET ANALYSFÖRUTSÄTTNINGAR

Den som är ansvarig för att genomföra analysen i det aktuella projektet benämns här *Analysansvarig* och skall som en inledning till projektet upprätta dokumentet *Analysförutsättningar*. I normalfallet bör granskare, beställare och analysansvarig komma överens om dessa förutsättningar innan analysarbetet inleds. Detta kan ske genom en inledande granskningsprocess som beskrivs i avsnitt 5.2, steg 1 till steg 8. Dokumentet *Analysförutsättningar* skall innehålla följande punkter

- Översiktlig beskrivning av problemställningen och de frågor som skall belysas och besvaras genom projektet.
- Beskrivning av syftet och målet med analysen. Skall resultaten användas som underlag för beslut? I så fall vilket/vilka? Skall resultaten syfta till att verifiera säkerhet och/eller funktion hos ett system eller en komponent? Se också avsnitt 4.4.
- Förslag till analysmodell och indata som man avser att använda och hur detta val är relaterat till syftet med projektet. I detta skede skall samtliga 5 punkter som anges i avsnitt 6.2 ovan översiktligt belysas. Se också avsnitt 4.24.2 där olika modelltyper beskrivs.
- I förekommande fall redovisning av vilka standarder, normer, bestämmelser, handböcker m.m. som analysen skall baseras på.
- Redovisning av övriga informationskällor som finns tillgängliga och som man avser använda.
- Beräkningsverktyg som avses användas samt eventuell beskrivning av deras status och grad av kvalitetssäkring, se avsnitt 4.3.
- Övriga viktiga antaganden och förutsättningar

Typexempel på innehållsförteckning i dokumentet *Analysförutsättningar* ges i Bilaga 6.1.

6.4 DOKUMENTET ANALYSRAPPORT

Projektet skall dokumenteras i en slutlig rapport som här benämns *Analysrapport*. Denna rapport skall utformas så att den lätt kan granskas av kvalificerad granskare. Följande generella krav kan ställas på dokumentationen

- Metodik, antaganden och resultat skall kunna förstås av kvalificerad utomstående person som inte medverkat i analysarbetet.
- Kravet på den information som skall finnas i rapporten är att hela analys- eller verifikationsprocessen skall kunna reproduceras av utomstående part.

Följande punkter skall ingå i Analysrapporten

- Tydlig beskrivning av problemställningen och de frågor som skall belysas och besvaras genom projektet.
- Tydlig beskrivning av syfte och mål för analysen.
- Detaljerad beskrivning av analysmodell och indata där alla de punkter som beskrivs i avsnitt 6.2 skall ingå. Osäkerheter i modell och indata är en viktig del i denna redovisning. Valda värden på indataparametrar skall presenteras på lättillgängligt sätt med kommentarer och referenser. Eventuella avvikelser eller kompletteringar i relation till dokumentet Analysförutsättningar skall redovisas och motiveras.
- Redovisning av val av numerisk approximation och konvergenskrav/toleranser som använts i analysen och hur konvergensen har kontrollerats.
- Transparent redovisning av analysresultat med fokus på aktuell problemställning och belysning av syftet med analysen. Presentationen av resultat bör göras så att de kan tolkas av tredje person på ett lättfattligt sätt.
- Redovisning av kontroller av resultatens tillförlitlighet. För mekaniska problem kan man exempelvis kontrollera jämvikt mellan beräknade reaktionskrafter och föreskrivna laster. En annan strategi för kontroll är att jämföra med överslagsmetoder som kan verifiera rimligheten i resultaten.
- Utvärdering av analysresultat med känslighetsanalyser och/eller parameterstudier för att belysa effekter av osäkerheter i modell och indata.
- Utvärdering av beräkningsresultatet och formulering av slutsatser. Den analysansvariges egen bedömning av graden av osäkerhet bakom gjorda slutsatser skall ingå.
- Sammanfattning
- Referenser. Alla referenser till andra källor skall tydligt redovisas.

Typexempel på innehållsförteckning i dokumentet "*Analysrapport*" redovisas i bilaga 6.2.

I vissa fall kan man göra direkt hänvisning dokumentet "*Analysförutsättningar*", om detta är tillräcklig detaljerat för att uppfylla kraven på redovisning som ges ovan.

I enklare fall kan Beräkningsförutsättningarna och Analysrapporten slås ihop till ett dokument. De principiella beräkningsförutsättningarna bör dock vara överenskomna innan beräkningsarbetet påbörjas.

7 Granskning av Analysförutsättningar och Analysrapporten

I detta avsnitt redovisas några viktiga synpunkter på vad man bör vara observant på som granskare. Beskrivningen kan också användas som någon form av checklista för den som sammanställer rapporterna. Granskning av Analysförutsättningar respektive Analysrapport beskrivs i olika underavsnitt. I ett särskilt avsnitt beskrivs hur själva beräkningarna bör granskas.

7.1 GRANSKNING AV ANALYSFÖRUTSÄTTNINGAR

Följande punkter, som också beskrivs i avsnitt 6.3, bör kontrolleras vad gäller analysförutsättningarna

1. Finns det en tydlig, översiktlig beskrivning av problemställningen och de frågor som skall belysas och besvaras genom projektet?
2. Är syftet och målet med analysen klart beskrivna? Framgår det att resultaten ska användas som underlag för beslut och i så fall vilket/vilka? Sägs det tydligt om resultaten syftar till att verifiera säkerhet och/eller funktion hos ett system eller en komponent?
3. Är samtliga fem punkter som anges i avsnitt 6.2 ovan översiktligt belysta? Dessa är
 - a. Relation mellan val av modell och syfte
 - b. Beskrivning av yttre påverkningar
 - c. Val av systemavgränsning och randvillkor
 - d. Val av förenklingar och antaganden
 - e. Val av indataparametrar för systemet och informationskällor till dessa
4. Finns det en preliminär redovisning av osäkerheter i analysmodell och indata och initieell uppskattning av hur dessa osäkerheter kan påverka slutresultatet?
5. Uppfyller dokumentet Analysförutsättningar övriga punkter som listas i avsnitt 6.3?

7.2 GRANSKNING AV REDOVISNINGEN I ANALYSRAPPORTEN - KONTROLL AV ATT REDOVISNINGSKRAVEN ÄR UPPFYLLDA

I normalfallet bör analysförutsättningarna vara beskrivna i ett separat dokument, som redan granskats och godkänts av granskaren. I sådant fall kan och bör det finnas direkta hänvisningar i Analysrapporten till detta dokument. Generellt bör granskaren kontrollera att analysen är baserad på dessa förutsättningar. Ofta behöver man modifiera eller ändra förutsättningarna under arbetets gång. Granskaren bör kontrollera att sådana ändringar är tydligt beskrivna i analysrapporten med angivande av motiv och konsekvenser.

Följande punkter bör kontrolleras vid granskning av Analysrapporten.

1. Är strukturen hos Analysrapporten i överensstämmelse med Bilaga 6.2?
2. Finns det en tydlig och heltäckande beskrivning av problemställningen och de frågor som skall belysas och besvaras genom projektet?
3. Är syftet och målet med analysen klart beskrivna? Framgår det att resultaten ska användas som underlag för beslut och i så fall vilket/vilka? Sägs det tydligt om resultaten syftar till att verifiera säkerhet och/eller funktion hos ett system eller en komponent?
4. Finns det en tydlig beskrivning av hur problemställningen förenklats till en (icke-numerisk) modell och vilka antaganden som då gjorts?
5. Finns det en detaljerad beskrivning av analysmodellen, antaganden och indata som man avser att använda och hur detta val är relaterat till syftet med projektet? Är samtliga fem punkter som anges i avsnitt 6.2 ovan översiktligt belysta? Se också avsnitt 4.2 där olika modelltyper beskrivs.
6. Är beskrivningen av analysmodell, valda villkor och indata tillräckligt detaljerad för att medge att analysprocessen skall kunna reproduceras av tredje part? Se avsnitt 6.2 som ger en beskrivning av vad som bör ingå.
7. Finns det en klar redovisning av de osäkerheter relaterade till analysmodell och indata som i större eller mindre grad alltid finns vid denna typ av analyser?
8. Finns det en redovisning av, inklusive referenser till, samtliga informationskällor som använts för analysen och val av indata, samt i förekommande fall standarder, normer, bestämmelser, handböcker m.m. som analysen är baserad på?
9. I många projekt finns det ofta flera olika aktörer inblandade, där t.ex. någon partner i en separat analys tar fram förutsättningar/data för analysen. Kontrollera särskilt om kommunikationen fungerat på rätt sätt i gränssnitt mellan olika aktörer.
10. Finns det en klar beskrivning av de beräkningsverktyg som har använts samt eventuell beskrivning av deras status och grad av kvalitetssäkring enligt avsnitt 4.3?
11. Finns det en klar beskrivning av hur man har kontrollerat att numerisk konvergens har erhållits?
12. Vid numeriska analyser baserade på kommersiella program måste man ta till speciella trick för att manipulera programmet att representera problemet på det sätt man önskar. Kontrollera att de antaganden som gjorts är tydligt beskrivna och värdera om den metod som använts ger önskat syfte.
13. Är redovisningen av analysresultaten transparent (för utomstående granskare) och är urvalet av resultat som redovisas relevant med avseende på problemställning och syftet med analysen?
14. Finns tillförlitlighetskontroller redovisade i Analysrapporten? Utvärdera relevansen av dessa. Granskaren bör också så långt möjligt formulera förenklade modeller som kan användas för överslagsberäkningar för att bekräfta rimligheten i resultaten och detektera eventuella grova fel.
15. Granska slutsatserna som ges i Analysrapporten. Stöder analysresultaten dessa? I vilken grad är de relaterade till problemställningen och det angivna syftet?

16. Finns det en diskussion och genomgång av osäkerheter enligt punkt 4 och konsekvenserna av dessa? Har man genomfört känslighetsanalyser i de fall behov av sådana kan finnas? Granskaren bör göra en egen värdering av osäkerheten i dragna slutsatser och dess konsekvenser.

Även Analysrapportens layout och läsbarhet bör granskas och förslag till revidering lämnas:

17. Är figurerna korrekt placerade i Analysrapporten och är de och figurtexterna så tydliga att de kan förstås av Granskaren?
18. Är språket och meningsbyggnaden korrekt och är texten lätt att förstå?

7.3 GRANSKNING AV BERÄKNINGARNA I ANALYSRAPPORTEN

I Analysrapporten ges en beskrivning av beräkningarna som ligger bakom och beräkningsresultaten redovisas. Slutsatser dras med detta som underlag. Granskaren måste kontrollera att själva beräkningarna har gjorts på ett korrekt sätt, så långt som är möjligt.

7.3.1 Allmänt

- Kontrollera att beräkningsförutsättningarna överensstämmer med vad som sägs i Analysförutsättningar och att eventuella avvikelser är ordentligt beskrivna och motiverade.
- Kontrollera vilka andra eventuella förutsättningar som valts, varför de inte finns med i Analysförutsättningar och om de är riktiga och relevanta.
- Kontrollera att använda indata (randvillkor, materialegenskaper, geometri etc) är korrekta.
- Gör en överslagsmässig rimlighetsbedömning av beräkningsresultat, jfr punkt 14 ovan. Exempel på detaljer i sådan ges i 7.3.2 och 7.3.3 nedan.
- Granska dragna slutsatser. Finns det underlag för dessa? Är underlaget svagt för vissa slutsatser?
- Värdera beskrivna osäkerheter.

7.3.2 Vid beräkning av transportprocesser.

- Kontrollera att definitioner av massbalans, flöden och ingående parametrar enligt avsnitt 4.2.2 är korrekta och att dimensionen hos ingående parametrar är tydligt beskrivna.
- Kontrollera särskilt materialegenskaper inom avgörande tillståndintervall, t ex inom det överhygroskopiska området vid fuktberäkningar, där detta är relevant.
- Studera speciellt resultaten vid systemränder eller systembegränsningar för att kontrollera att de randvillkor som beskrivs i rapporten faktiskt också användes vid själva analysen. Om man t.ex. antar att en rand innebär förhindrad värme eller fukttransport kan man se på resultaten om detta var fallet.

- d. Studera på samma sätt gradienter hos fördelningar vid materialgränser; flöden i båda intilliggande material ska vara lika i materialgränsen vilket medför skillnader i gradienter beroende på materialens transportegenskaper.

7.3.3 Vid strukturmekaniska analyser

- a. Kontrollera om laster och materialparametrar är angivna som karakteristiska värden eller dimensioneringsvärden i de fall analysen används för säkerhetsverifiering.
- b. Kontrollera också att lastkombinationer som valts är tydligt beskrivna och adekvata samt valda på basis av de konstruktionsregler som används.
- c. Om analysen däremot innebär jämförelse med experimentella värden kan däremot inte värden från normer användas utan här är det mer motiverat att använda medelvärden för materialparametrar av olika slag så att man kan jämföra med experimentella resultat. I detta fall är det bäst om materialparametrar mäts i separata tester.
- d. Förenklade överslagsmodeller kan ofta baseras på jämviktssamband som kan skapas eventuellt med vissa förenklingar som utgångspunkt.
- e. För dynamiska problem kan man ofta förenkla/approximera problemet till en en-frihetsgradsmodell, som kan användas för att skatta lägsta egenfrekvensen. Man kan då också med enkla metoder göra analytiska överslagsberäkningar av dynamiska lasteffekter. Exempel: En hög byggnad som har analyserats dynamiskt kan förenklas till en enkel konsolpelare inspänd i marken. Egenfrekvensen kan då lätt slås upp i en handbok.

8 Granskning (verifiering) av beräkningsverktyg

Resultatet från alla numeriska analyser bör verifieras. Numeriska analyser med finita elementmetoden eller finita differensmetoden är alltid (mer eller mindre bra) approximationer av ett verkligt beteende. Graden av verifiering som krävs av en numerisk modell beror på projektets dignitet, där större konsekvenser vid en eventuellt felaktig beräkning naturligtvis kräver högre grad av verifiering.

I följande avsnitt beskrivs vilka typer av verifieringar som bör genomföras av numeriska modeller och av dess resultat. Dessa krav är att anse vara minimumkrav och är inte på något sätt en garanti att beräkningen är korrekt.

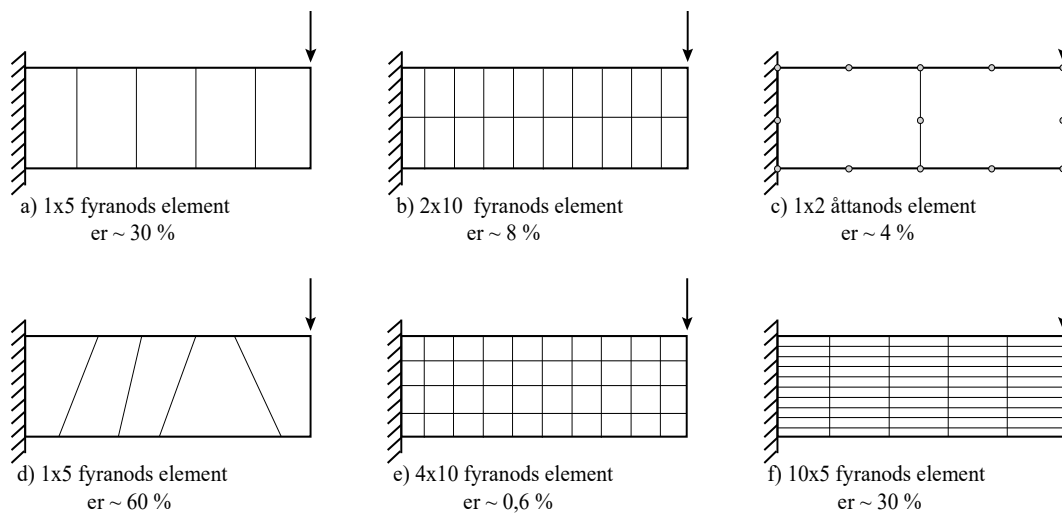
8.1 VERIFIERING AV BERÄKNINGSVERKTYG FÖR MEKANISKA PROBLEM

I detta avsnitt ges en kort beskrivning av hur numeriska, mekaniska, analyser bör verifieras. Ytterligare information fås t.ex. i [11].

8.1.1 Konvergens

Alla numeriska beräkningar bör verifieras så att de når en konvergerande lösning, dvs att elementindelning är tillräcklig för att numeriska modellen ska ge samma resultat oavsett förfining av elementindelningen eller användning av högre ordningens element. Vid användande av volyms- och skalelement är det dessutom viktigt att elementen inte är förvrängda från deras ideala (kvadratiske eller triangulära) form. I dessa fall bör förhållandet mellan sidornas längd på elementet så nära 1:1 som möjligt. I Figur 8-1 illustreras vikten av detta, där ett exempel på hur stor skillnad i fel som kan uppstå vid beräkning av förskjutningen hos en konsol baserat på olika elementindelningar.

Lägre ordningens element, som använder en linjär interpolation mellan noderna (dvs linjära formfunktioner) kan inte beskriva böjning. Detta innebär att vid användande av lägre ordningens element krävs som tumregel minst fyra element över tvärsnittshöjden för att de ska kunna beskriva böjning på ett korrekt sätt, se Figur 8-1.



Figur 8-1 Exempel på fel vid beräkning av förskjutning i en konsol vid olika elementindelningar

Vid linjärelastiska FE analyser kommer strukturens styvhet att överskattas om en otillräcklig elementindelning används. Detta innebär att vid t.ex. en bucklingsanalys kommer bärförmågan avseende knäckning att överskattas vid en otillräcklig elementindelning med FEM.

Kontroller som alltid bör genomföras i en numerisk mekanisk analys:

- Ökad diskretisering (mindre element eller högre ordningens element) bör leda till försumbar skillnad i resultat.
 - × Deformationer/Laster konvergerar snabbare än t.ex. töjningar/spänningar.
- Kontrollera att jämvikt är uppnådd, dvs summan av reaktionskrafter är lika med yttre belastning.
 - × Om flera belastningsfall är applicerade bör beräkningar genomföras så att varje belastningsfall studeras separat och kontrollera att superposition av dessa motsvarar strukturens respons vid samtliga belastningar aktiva (OBS ej aktuellt vid icke-linjära analyser efter som superpositionsprincipen ej gäller).
 - × Vid icke-linjära analyser uppfylls inte jämvikt, istället anses analysen vara tillräckligt noggrann om t.ex. skillnad mellan yttre och inre laster är mindre än ett föreskrivet toleransvillkor. I vissa programvaror accepteras dessutom ett belastningsinkrement efter ett föreskrivet antal iterationer, trots att toleransvillkoret ej uppfyllts. Vid icke-linjära analyser bör därför detta studeras noggrant, där bl.a. obalanserade krafter och/eller obalanserade energidensiteter bör vara små.
 - × Vid kvasi-statiska eller dynamiska analyser används dessutom en explicit lösningsalgoritm där toleranser saknas helt. Vid dessa analyser tas istället mycket små last- eller tidsinkrement. Dessa typer av analyser kräver än mer granskning avseende att en stabil lösning har uppnåtts som med önskvärd noggrannhet uppfyller jämvikt. Vid dessa analyser bör det verifieras att den kinetiska energin är försumbar.

Rekommendationer avseende elementstorlek

Elementindelningar bör väljas så att relativt utjämnade spänningsfördelningar erhålls i resultatet.

Många beräkningsprogram presenterar ett utjämnat spänningsfält vid konturplottar och det är därför viktigt att även studera de verkligt beräknade spänningarna i integrationspunkterna (dvs utan utjämningsteknik).

Vid dynamiska beräkningar är det även viktigt att elementstorleken är tillräckligt liten för att den ska kunna fånga beteendet orsakat av samtliga frekvenser som finns inom frekvenser av intresse. Som tumregel kan följande ekvation användas för att definiera största tillåtna elementlängd som funktion av frekvensinnehåll

$$L_{\max} = \frac{c}{n_{\min} \cdot f_{\max}} \quad (8.1)$$

där,

c = vågutbredningshastighet

$n_{\min}$ = antal punkter som minst krävs för att beskriva en sinusvåg (typisk > 5 st)

$f_{\max}$ = högsta frekvens av intresse

Enligt [18] bör minst 10 stycken punkter användas som $n_{\min}$. Detta innebär att vid en seismisk analys av en betongdamm krävs därmed en elementstorlek på högst 6 m, baserat på att betongens vågutbredningshastighet är ca 3000 m/s och högsta frekvens av intresse är 50 Hz.

Vid icke-linjära beräkningar krävs en avsevärt mycket finare elementindelning än vad som krävs vid linjärelastiska beräkningar. Orsaken till detta är för att den energi som finns lagrad inom elementen som frigörs i samband med uppsprickning ska kunna tas upp av omkringliggande element och förhindra att ett snap-back beteende uppstår. Enligt den Holländska guidelinen [13] för icke-linjära analyser måste elementlängden vid en exponentiell arbetskurva för uppsprickningen uppfylla

$$L_{\max} < \frac{E \cdot G_f}{f_t^2} \quad (8.2)$$

där,

E = Elasticitetsmodul

G_f = Brottenergi

f_t = draghållfasthet

Som exempel kan nämnas att en konventionell C30/37 betong med medelvärden enligt EN 1991-1-1, Eurokod 2, motsvarande $E = 33 \text{ GPa}$ och $f_t = 2,9 \text{ MPa}$ samt brottenergi enligt Model Code 2010 på $G_f = 140 \text{ Nm/m}^2$ kräver därmed en elementlängd som är ca 0,5 m eller mindre.

I den holländska riktlinjen för icke-linjära analyser [13] ges även följande rekommendationer avseende elementstorlekar vid volyms och skalmodeller för att simulera uppsprickning, se Tabell 8-1.

Tabell 8-1 Rekommenderad största elementlängd vid icke-linjära analyser [13] – l, h och b är balkens längd, höjd och bredd.

Balk	Största elementlängd	Platta	Största elementlängd
2D modell	$\min\left(\frac{l}{50}, \frac{h}{5}\right)$	2D modell	$\min\left(\frac{l}{50}, \frac{b}{50}\right)$
3D modell	$\min\left(\frac{l}{50}, \frac{h}{5}, \frac{b}{5}\right)$	3D modell	$\min\left(\frac{l}{50}, \frac{b}{50}, \frac{h}{5}\right)$

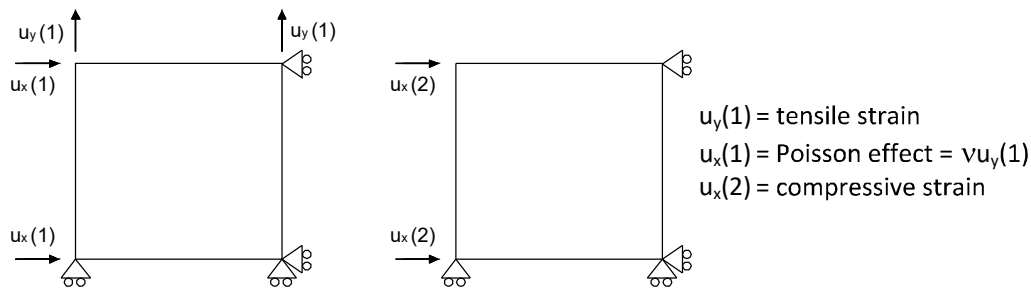
Observera att dessa rekommendationer på största elementstorlekar inte är en garanti för att konvergerande resultat erhålls, utan analyserna kan kräva än mer förfinad elementindelning än vad som ges i rekommendationerna ovan.

8.1.2 Verifiering av materialmodell

Vid användande av fördefinierade materialmodeller i kommersiella FE program eller egenutvecklade materialmodeller så krävs verifiering av att materialmodeller agerar som förväntat.

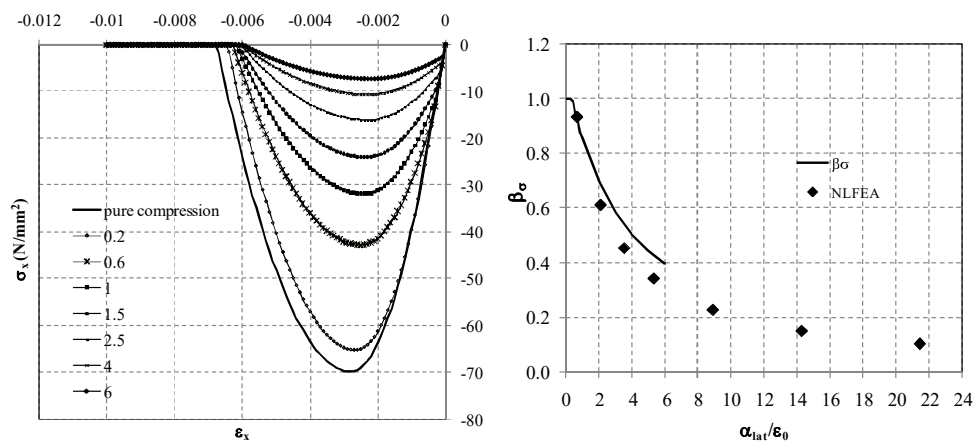
Denna typ av analyser genomförs på endast ett element där syftet är att studera att materialmodellen ger förväntad respons vid enaxiell och fleraxiella spänningstillstånd. I den Holländska riktlinjen ges följande exempel på en lämpligt test, se Figur 8-2. Syftet med detta benchmarkexempel är att studera interaktionen mellan skada orsakad av drag och tryckbelastning. I betong reduceras tryckhållfastheten som följd av sprickor som är parallella med tryckbelastningsriktningen.

I ett första beräkningssteg appliceras en succesivt ökande förskjutning $u_y(1)$ i syfte att orsaka en fullständig uppsprickning (makrospricka) i betongelementet. Samtidigt med denna belastning ges även en tryckande $u_x(1)$ som motsvarar tvärkontraktionseffekten, dvs $u_x(1) = \nu u_y(1)$. I nästföljande steg appliceras därefter en succesivt ökande förskjutning $u_x(2)$ i syfte att orsaka en tryckbelastning i elementet parallellt med sprickutbredningen.



Figur 8-2 Numerisk modell för verifi­ering av materialmodell, Rijkswaterstaat (2012) [13]

Användaren bör visa att materialmodellen kan återge den enaxiella dragkurvan som definieras som indata baserat på det första beräkningssteget. I det andra beräkningssteget studeras hur tryckhållfastheten påverkas på grund av lateral uppsprickning. Figur 8-3 illustrerar ett exempel på resultat från benchmarkexemplet, där det tydligt framgår att materialmodellen beaktar reducerad tryckhållfasthet på grund av lateral uppsprickning. I den vänstra grafen illustreras spännings-töjningskurvor vid varierande grad av applicerat förhållande mellan drag- och trycktöjning. I den högra grafen illustreras spännings-töjningskurvor vid varierande grad av applicerat förhållande mellan drag- och trycktöjning.



Figur 8-3 Exempel på resultat från benchmark exempel, Rijkswaterstaat (2012) [13]

8.1.3 Verifierande beräkningar

Om det är en relativt enkel struktur och eller relativt enkelt belastningsfall så att lösningen går att uppskatta med en handberäkningsmetod så bör detta genomföras för att försäkra sig om att resultatet från den numeriska beräkningen verkar rimligt. Detta är oftast möjligt för att åtminstone göra en bedömning om numeriska beräkningen ger rimliga resultat eller ej.

I projekt av hög dignitet med en komplicerad struktur och/eller belastningsfall som (med tillräcklig noggrannhet) inte går att verifiera med hjälp av förenklade handberäkningsmetoder, bör en oberoende (förenklad) jämförande numerisk

beräkning genomförs. T.ex. är det i vissa fall möjligt att använda en förenklad 2D modell för att verifiera mer avancerade 3D modeller.

Response-2000 är ett exempel på programvaror som enkelt kan användas för verifiering av tvärsnittskapacitet t.ex. bärförmåga vid brott etc, se avsnitt 4.3.2. Om numeriska analyserna används för t.ex. globalanalys av en damm går det lämpligtvis att använda CADAM (vid gravitationsdammar) för verifiering eller mot klassiska stelkroppsanalyser av stabilitetsbrott, se t.ex. [9] och [3].

8.2 VERIFIERING AV BERÄKNINGSVERKTYG FÖR TRANSPORTPROCESSER

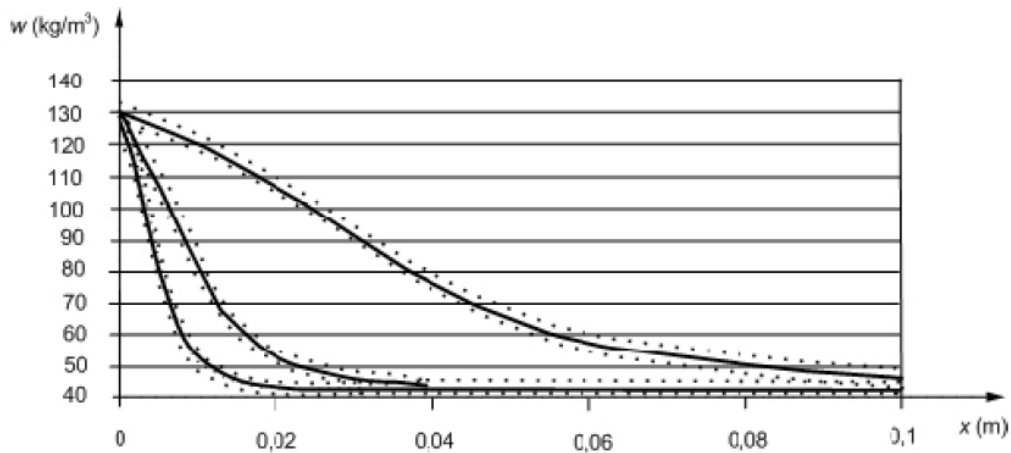
Verifiering av att beräkningsverktyg för transportprocesser ger korrekta lösningar är sällsynt men i de fall sådan verifiering görs används endera av följande principiella metoder.

- Jämförelse med analytiska lösningar (för enklare fall),
- Jämförelse med lösningar med andra, verifierade beräkningsverktyg,
- Jämförelse med lösningar med samma beräkningsverktyg med succesivt minskade tidssteg eller elementindelning.

I fall a. finns en EN-standard, EN 15026 [7], för numeriska beräkningsverktyg för värme- och fuktändringar. Den är begränsad till endimensionella flerskiktsskonstruktioner med tidsvarierande randvillkor. Vilka ekvationer som ska användas är reglerat i detalj. Begränsningarna är stora, t ex

- konstant geometri, inga fuktrörelser,
- inga kemiska reaktioner;
- sorptionsvärme antas lika med ångbildningsvärme/kondensationsvärme;
- ingen ändring av materialegenskaper med tiden;
- lokal jämvikt mellan vätska och ånga, utan hysteres;
- adsorberat fukt (som i betong) ingår inte;
- sorptionskurvan är inte temperaturberoende;
- ingen konvektion.

Under dessa förutsättningar definieras ett "typfall" (benchmark example) med fuktupptagning i ett halvoändligt fall med ett material. Från konstanta initialvillkor ges temperatur och RF i omgivningen en stegändring. För detta fall finns en analytisk lösning av fukt- och temperaturfördelningen vid olika tidpunkter. Några fuktfördelningar visas i Figur 8-4.



Figur 8-4: Analytisk lösning till typfallet i EN 15026:2007 [7]

Punkterna kring kurvorna i Figur 8-4 anger verifieringskravet; fukthalten ska ligga inom $\pm 2.5\%$ från den analytiska lösningen.

Det är lätt att sätta upp liknande typfall, t ex samma fall som ovan men utan temperaturändringen, både för halvoändliga fall och fall med begränsad tjocklek. Sådana kan tillämpas på beräkningsverktyg för värme, fukt, vatten och joner. Typfallen är ju väldigt enkla jämfört med vilka fall som avancerade beräkningsverktyg kan lösa. En jämförelse med sådana säger då bara att verktyget åtminstone klarar av att hitta rätt lösning till sådana enkla fall. En bättre verifiering bör därför också krävas, t ex enligt metod b. eller c.

9 Verifiering av analysansvariges kompetens för aktuell typ av beräkning och beräkningsverktyg

En avancerad beräkning kan bestå av flera delar och utföras av flera utförare (enskild utförare), men för hela beräkningsarbetet ansvarar en person (gruppleddare) med följande kompetenser:

Gruppleddare

- Civilingenjör, eller motsvarande, (ej nödvändig om gruppen har fler än en civil ingenjör)
- Har erfarenhet av att utföra avancerade beräkningar av det slag som är fråga om (ej nödvändig om gruppen har fler minst en utförare som har utfört avancerade beräkningar av det slag som är fråga om)
- Har erfarenhet av att utföra beräkningar med den aktuella mjukvaran (ej nödvändig om gruppen har minst en utförare med erfarenhet av att utföra beräkningar med den aktuella mjukvaran)
- Kunskap och förståelse för tekniska principer
- Praktisk tillämpning av teknisk kunskap och expertis
- Ledarskap och management
- Kommunikation och interpersonella färdigheter

Enskild utförare

- Civilingenjör, eller motsvarande, (ej nödvändig om gruppleddaren är civil ingenjör)
- Har erfarenhet av att utföra avancerade beräkningar som är aktuella i det kommande projektet (ej nödvändig om gruppleddaren eller minst en utförare inom gruppen har erfarenhet av att utföra avancerade beräkningar av det slag som är fråga om)
- Har erfarenhet av att utföra beräkningar med den aktuella mjukvaran (ej nödvändig om gruppen har minst en utförare med erfarenhet av att utföra beräkningar med den aktuella mjukvaran)
- Kunskap och förståelse för tekniska principer

10 Referenser

- [1] Baroghel-Bouny, V. (1994) Characterization of cement pastes and concretes - Methods, analysis, interpretations (in French), Ph.D. Dissertation (LCPC Publ., Paris, 1994), 468 p.
- [2] Björnström, J., Ekström T., Hassanzadeh M. (2006) Spruckna betongdammar – översikt och beräkningsmetoder, Elforskrapport 06:29, Elforsk, Stockholm
- [3] Broberg L., Thorwid M. (2015) Evaluation of Failure Modes for Concrete Dams, Examensarbete, TRITA BKN 455, KTH.
- [4] Cervenka V., Jendele L. & Cervenka J. (2015) ATENA Program Documentation – Part 1 Theory. Cervenka Consulting, Prag.
- [5] de Borst R., Remmers J.J.C., Needleman A., Abellan M-A. (2004) Discrete vs smeared crack models for concrete fracture: bridging the gap, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, vol 28, pp 583-607.
- [6] EKS 9 (2013), "tillämpning av eurokoder", BFS 2013:10, Boverket, 18/6-2013.
- [7] EN 15026 Hygrothermal performance of building components and building elements - Assessment of moisture transfer by numerical simulation, EN 15026:2007: E, April 2007.
- [8] fib Model Code 2010, bulletins 55 and 56, International Federation for Structural Concrete, Lausanne, Switzerland, 2012.
- [9] Fu C., Hafliðason B. (2015) Progressive failure analyses of concrete buttress dams: Influence of crack propagation on the structural dam safety. Examensarbete, TRITA BKN 457, KTH.
- [10] Malm R. (2015) Non-linear analyses of concrete beams with Abaqus. Kurskompendium för AF2102 Concrete Structures, advanced course. Edition 2015. KTH, Stockholm.
- [11] Malm R. (2016) Guideline for structural FE analyses of concrete dams. SVC/Energiforsk-rapport (under bearbetning), Energiforsk, Stockholm.
- [12] Nilsson L.-O., Tang L. (2001) Interaction and Its Effect on Substance Transport in Concrete. International Conference on Ion and Mass Transport in Cement-Based Materials, Toronto October 4-5 1999, American Ceramic Society Special Volume of Materials Science of Concrete 2001.
- [13] Rijkswaterstaat, Guidelines nonlinear Finite Element Analysis of Concrete Structures, Scope: Girder Members. Document RTD 1016:2012, Ministry of Infrastructure and Environment, the Netherlands, 2012.
- [14] SBN avd 2A (1980), Bärande konstruktioner med kommentarer, Statens planverk, Liber, ISBN 91-38-05535-x, 1980.
- [15] SS-EN 1990, "Eurokod –Grundläggande dimensioneringsregler för bärverk", SIS, rättad version december 2014.

- [16] Svenska Betongföreningens handbok till Eurokod 2, Volym I, betongrapport nr 15, andra utgåvan, 2012.
- [17] Svensson, Urban (1985), "Konstruktionsberäkningar", Handboken Bygg K03, LiberTryck, Stockholm 1985.
- [18] USBR, 2006. State-of-Practice for the Nonlinear Analysis of Concrete., U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation. Denver.
- [19] Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., (1989), "The Finite Element Method", 4th edition, volume 2, McGraw-Hill, New York.

Bilaga 4.1 Mekanik- och transportsanalys; jämförelse mellan ekvationer

Avsnittet 4.2.1 behandlar mekanikberäkning för deformerbara kroppar och avsnittet 4.2.2 behandlar transportberäkningar för porösa material. I denna bilaga jämförs för 1D-fallet grundläggande ekvationer för dessa två typer av beräkningar. Det framgår att mekanikberäkningar, dvs beräkning av spänningar och deformationer, och transportberäkningar, dvs värmetransport och/eller masstransport, har tydliga likheter, åtminstone i 1D-fallet.

A. kraftjämvikt jämfört med massbalans

I figuren nedan illustreras de kvantiteter som ingår i en 1D kraftjämvikt och en 1D massbalans (eller energibalans) för en volym med längden dx och tvärsnittet A :

Kraftjämvikt:

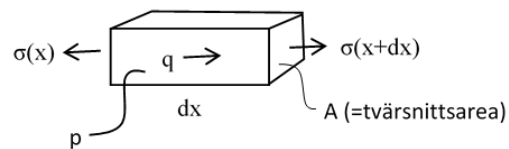
σ =spänning (kraft/yta)

q =last (kraft/volym)

p =rörelsemängd/volym

(massa/volym*hastighet)

($p=\rho \cdot du/dt$ där ρ är densitet, u förskjutning och du/dt hastighet)

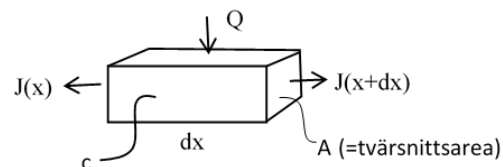


Massbalans:

J =massflöde (massa/(yta * tid))

Q =sänktterm (massa/(volym*tid))

c =massinnehåll (massa/volym)



Figur B4.1-1 De kvantiteter som ingår i en 1D kraftjämvikt och en 1D massbalans (eller energibalans) för en volym med längden dx och tvärsnittet A .

Kraftjämviktekvationen (ofta kallad alternativt kallad rörelseekvationen) säger att "ändring av rörelsemängd per tid = resulterande kraft" eller "massa * acceleration = resulterande kraft":

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial \sigma}{\partial x} + q \quad \text{eller} \quad \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma}{\partial x} + q \quad (\text{B4.1-1})$$

Massbalansekvationen säger att "ändring av massan per tid = -(det som transporteras bort + det som försvinner genom t.ex kemisk omvandling till annat ämne)"

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial J}{\partial x} - Q \quad (\text{B4.1-2})$$

Om man jämför med Figur 4-1 i avsnitt 4.1 så representerar ekvationen (B4.1-1) det som i Figur 4-1 kallas "3. Kraftjämvikt ..." och ekvationen (B4.1-2) det som kallas "3. Energibalans ekvation ...".

Ekvationerna (B4.1-1) och (B4.1-2) avser det generella fallet med icke-stationära processer. **För stationära processer fås:**

Kraftjämviktekvationen vid konstant hastighet du/dt och vid stillastående (statiska eller kvasi-statiska fallen):

$$0 = \frac{\partial \sigma}{\partial x} + q \quad (\text{B4.1-3})$$

Massbalans ekvationen vid konstant massinnehåll c (stationärt flöde):

$$0 = -\frac{\partial J}{\partial x} - Q \quad (\text{B4.1-4})$$

B. Styvhetsegenskaper jämfört med flödesegenskaper

Materialets egenskaper i form av dess densitet respektive dess (massa hos det transporterade ämnet)/volym ingår i kraftekvationen (B4.1-1) respektive massbalansen (B4.1-2) för fallet icke-stationär process. Inför analys av spänning (spänningsflöde) respektive mass- eller värmefflöde behövs även någon materialparameter som ger samband mellan flödet och den flödesdrivande gradienten (derivatan). Dessa materialegenskaper representeras i Figur 4-1 i avsnitt 4.1 av sambanden "2. Material- och tillståndsberoende samband ..." och avser materialets styvhets respektive dess mass- eller värmefflödesegenskaper.

Vid mekanikanalys ger materialets styvhets E koppling mellan derivatan av förskjutningen u och spänningen σ :

$$\sigma = E \frac{\partial u}{\partial x} \quad (\text{B4.1-5})$$

Materialparametern E kan bero av många tillståndskvantiteter som t.ex. temperatur, och vid olinjärt materialbeteende också av u 's derivator och dess tecken ("av- resp. pålastning"). Derivatan av u , $\partial u / \partial x$, är töjningen och brukar betecknas ε .

Vid transportanalys ger materialets flödesparameter k_ψ koppling mellan derivatan av någon kvantitet ψ , som vid masstransportanalys kan vara C (massa/volym) eller vid värmefflödesanalys kan vara temperaturen θ , och flödet J :

$$J = -k_\psi \frac{\partial \psi}{\partial x} + J'_{fluid} \cdot C' \quad (\text{B4.1-6})$$

Materialparametern k_ψ kan bero av många tillståndskvantiteter som t.ex. temperatur, och vid olinjärt flöde också av Ψ och/eller dess derivator och dess tecken. Den andra termen, $J'_{fluid} \cdot C'$, se Avsnitt 4.2.2 Ekvation (4.4), motsvarar en komplex situation med transport av det analyserade ämnet även genom att det ingår i något annat ämne (gas eller vätska) som rör sig i det porösa materialet.

Bilaga 4.5 Exempel på beräkningar för vattenkraftskonstruktioner

B4.5.1 Inledning

Syftet med exemplen är att visa på vanliga lastfall och vanliga problemställningar för en vattenkraftskonstruktion (utskovspelare) samt olika modeller som kan användas.

För vattenkraftskonstruktioner rör sig beräkningar oftast om

- Dimensionering av nya konstruktioner
- Tillståndskontroll av befintliga konstruktioner

Avseende beräkningar för nya konstruktioner utförs dessa oftast baserat på normer eller standarder. Laster, lastkombinationer och miljöfaktorer bestäms innan projekteringen enligt dessa normer/standarder. Beräkningar för uppfyllande av stabilitet och tvärsnitt utförs på ett standardiserat sätt och variabler väljs från normerna/standarderna. T.ex. krav på täckskikt, betongkvalitet, etc för vald miljöklass.

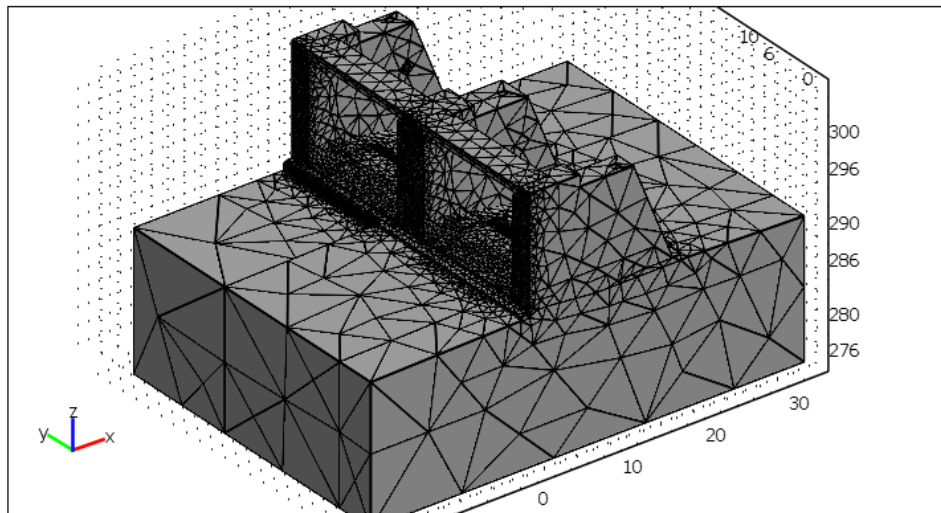
Avseende beräkningar för befintliga konstruktioner kan det vara lite mer komplicerat, i alla fall om det rör sig om en skadeutredning. Det måste då närmare studeras vilka laster och vilka miljöbetingelser som varit aktuella för just den aktuella konstruktionen för att utröna orsaken till skadorna. Först när man vet orsaken kan man utföra en lämplig åtgärd. För att bestämma nuvarande och kommande strukturella säkerhet måste det bestämmas kvarvarande dimensionerande bärförmåga samt dimensionerande lasteffekter, vilket kan vara mycket svårt då både bärförmågan och lasteffekterna bör inkludera osäkerheter i valda parametrar, d.v.s. en tillförlitlighetsanalys bör göras. Då de mekaniska beräkningarna kan bli mycket beräkningstunga kan en fullständig tillförlitlighetsanalys bli ogörlig. En enklare känslighetsanalys bör då göras.

I avsnitt B4.5.2 visas ett exempel på en beräkning av stabilitet samt i avsnitt B4.5.3 ett exempel på en beräkning av sprickor.

B4.5.2 Exempel 1 för befintliga konstruktioner – stabilitet hos utskovspelare

Inledning

Här ges ett exempel på en kopplad transportmekanik beräkning enligt 3) i avsnitt 4.1, nämligen transport av vatten i och under konstruktionen samt mekaniska spänningar i den. Använda differentialekvationer FEM-formuleras automatiskt i ett FEM-program och beräknas. Elementen är av typ Lagrange – Linear med 3 st. noder per sida av varje element, se Figur B4.5-1.



Figur B4.5-1 Använd "mesh" i beräkningarna

Vid beräkning av stabilitet för en utskovspelare är vattentryck, egentyngd och islast oftast de dominerande lasterna.

Vattentryck består dels av hydrauliskt tryck mot pelarens vattensidor och dels porvattentryck i pelaren eller mellan pelaren och berget (upptryck), eller i berget i slag.

Istryck ansätts som en ytlast, i en meter brett band strax under vattenytan, mot uppströmssidan. Egentyngd ansätts som en volymslast i själva konstruktionen.

Pelaren får inte stjälpas runt en tänkt rotationsaxel i nedströmsänden och inte heller glida längs undergrunden.

Porvattentryck

Porvattentryck/upptryck ansätts ofta förenklat enligt beskrivning i RIDAS avsnitt 7.3.2.1.3, men kan också beräknas med FE-modellering. Porvattentryck kan även mätas för verifiering.

Här visas ett exempel på en teoretisk FEM-beräkning av vattenflöden, vattentrycksgradienter och vattentryck i dammen inklusive undergrund. Stationära flöden antas.

Fördelen med att använda FEM-beräknade vattentryck är att mer komplexa geometrier och förhållande kan beräknas, samt, som i detta exempel, inverkan av en åtgärd med nya upptrycksrör kan studeras. Även jämförelser mot mätningar kan ske mer nyanserat om vattentrycken FEM-beräknas.

Materialet antas något förenklat som vattenmättat, d.v.s. Darcys lag kan gälla utan hänsyn till att en del av betongens nedströmssidor troligen har en vattenmättnadsgrad under 1, d.v.s. $RF < 100\%$. I detta fall används framräknade portryck för att ansättas som ytlaster mot ytor där vattentryck verkar, som i u.s.-sidor och under dammen och då spelar det ingen signifikant roll på säkra sidan att

små partier i nedströms (n.s.)-sidor av betongen ej är vattenmättade. I verkligheten kan grundvattenytan vara något lägre än bergets överkant nedströms om skiborden, vilket teoretiskt minskar upptrycket under skiborden något, men på säkra sidan bortses från detta.

Här antas att materialet är isotropt, vilket innebär att den hydrauliska konduktiviteten k_w är konstant i alla punkter inom ett och samma material och i alla riktningar. k_w antas inte variera med vattentrycket.

Vattenflöde och vattentryck beräknas med hjälp av kontinuitetsekvationen och Darcys lag:

$$\nabla \cdot (\mathbf{v}_w) = 0 \quad (\text{B4.5-1})$$

$$\mathbf{v}_w = -k_w \nabla H \quad (\text{B4.5-2})$$

$$H = y + \frac{p}{\rho \cdot g} \quad (\text{B4.5-3})$$

där ∇ = nabla operator ($\nabla^T = \left[\frac{\partial}{\partial x} \quad \frac{\partial}{\partial y} \right]$), för 3D-modell tillkommer $\delta/\delta z$ (1/m);

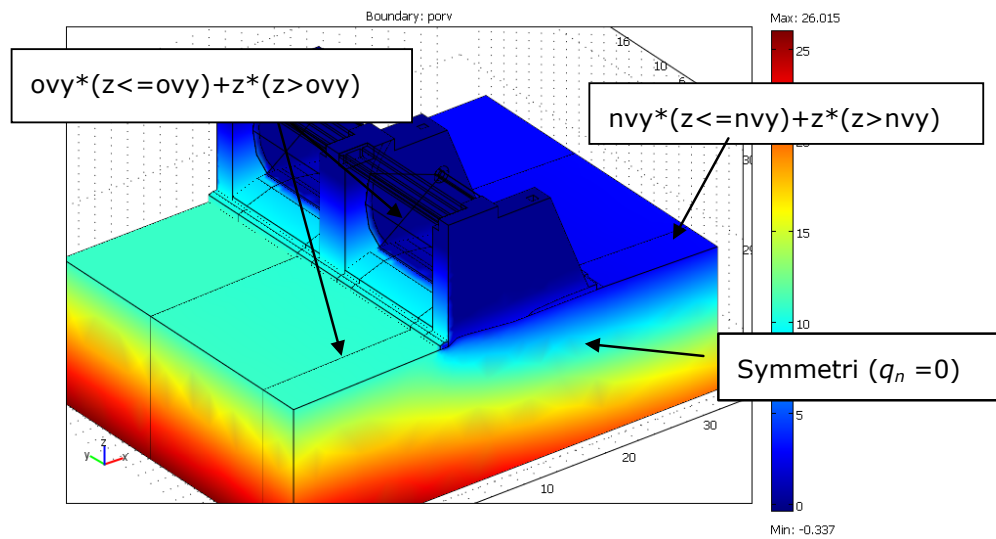
v_w = vattenhastighet (m/s); k_w = hydraulisk konduktivitet (ibland benämnd permeabilitet nedan) (m/s); H = vattentryckshöjden (m); y = lägesnivå över referensnivån ± 0.0 m.ö.h, kan även vara z i 3D-modell.; p = porvattentrycket (Pa); ρ = vattnets densitet (kg/m³); och g = tyngdaccelerationen (m/s²).

"Solver type" är en stationär linjär typ och "solution form" är av typ "coefficient". I den slutliga lösningen erhålls porvattentryck som

$$p = u - y \quad (\text{B4.5-4})$$

där u = tryckpotentialen som erhålls som resultat av FEM-beräkningen ($p/(\rho \cdot g) + y$) (m).

Figur B4.5-2 visar beräknat porvattentryck givet randvillkoren i samma figur och FEM-formulering av ekvationerna (B4.5-1) – (B4.5-2). Mesh enligt figur B4.5-1.



Figur B4.5-2 Beräknat porvattentryck i LK1. $ovy = DG = +300$, $nvy = +289$. Villkoret i figuren innebär att trycken ovy och nvy sätts mot ytor under vattenytor upp- resp. nedströms. Ovanför vattenytor sätts tryck $= z$. q_n = vattenflöde normal randen.

Beräkningar mekanik

Spänningar i betong i dammar kan generellt beräknas med vattentrycket ansatt som randlaster och med ekvation (B4.5-5), eller som porvattentryck som en volymslast och med ekvation (B4.5-7). I det aktuella exemplet antas vattentryck som randlast mot pelaren. Vattentrycket erhålls från beräkningen av vattenflödet ovan. Men som information nämns även metoden med portryck, ekvation (B4.5-7).

Betongen i dammen beräknas med solida element. Kraftbalansen löses med jämviktsekvationen

$$-\nabla \sigma = b \quad (\text{B4.5-5})$$

där σ = spänning i materialet (Pa); och b = volymskrafter (N/m^3). Spänning-töjningssambandet beräknas med

$$\sigma = D\varepsilon_{el} + \sigma_0 = D(\varepsilon - \varepsilon_{th} - \varepsilon_0) + \sigma_0 \quad (\text{B4.5-6})$$

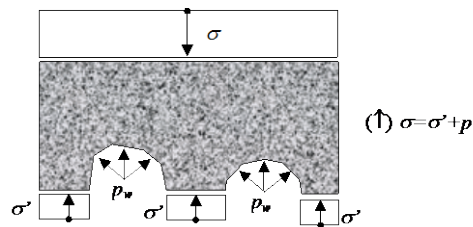
där D = elasticitetsmatrisen (Pa); ε_{el} = total elastisk töjning (-); ε = töjning (-); ε_{th} = termisk elastisk töjning (-); ε_0 = initiell töjning (-); och σ_0 = initiell spänning (Pa).

Om vattentryck ska antas med porvattentryck som volymskraft i dammen skrivs ekvation (B4.5-5) som

$$\sigma' = \sigma - \nabla p_w - \nabla \sigma' = b - \nabla p_w \quad (\text{B4.5-7})$$

Figur B4.5-3 visar en principfigur av porvattentryck, effektivtryck och totaltryck. Betongen antas vattenmättad så att Darcy's lag gäller. Räknar man med porvattentryck resulterar det i något (ca 5 %) högre spänningar än om man använder extern ytlast [19]. Om betongen uppenbarligen inte är vattenmättad, så som vid nya betongkonstruktioner som inte (ännu) hunnit vattenmättas, eller vid

mycket tät betong är det naturligtvis mer realistiskt att använda vattentryck som ytlast.

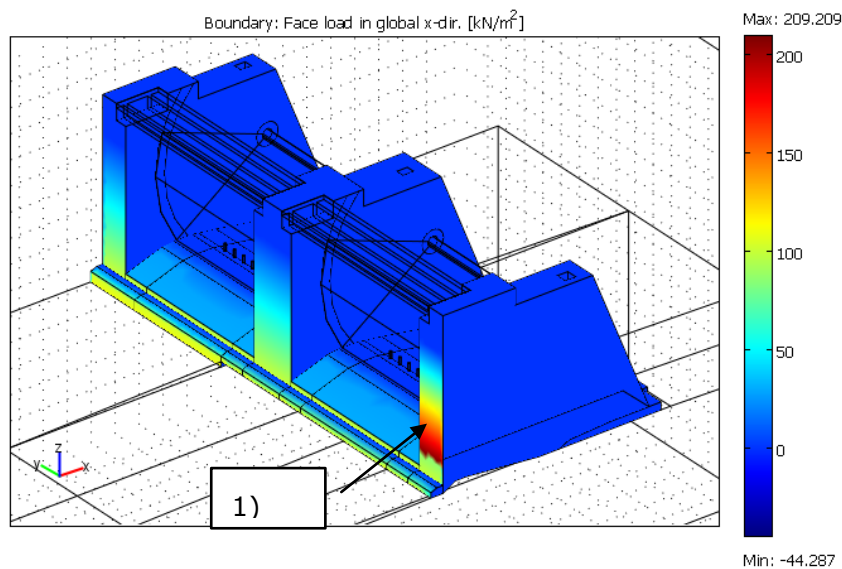


Figur B4.5-3 Princip för effektivtryck i en porös kropp

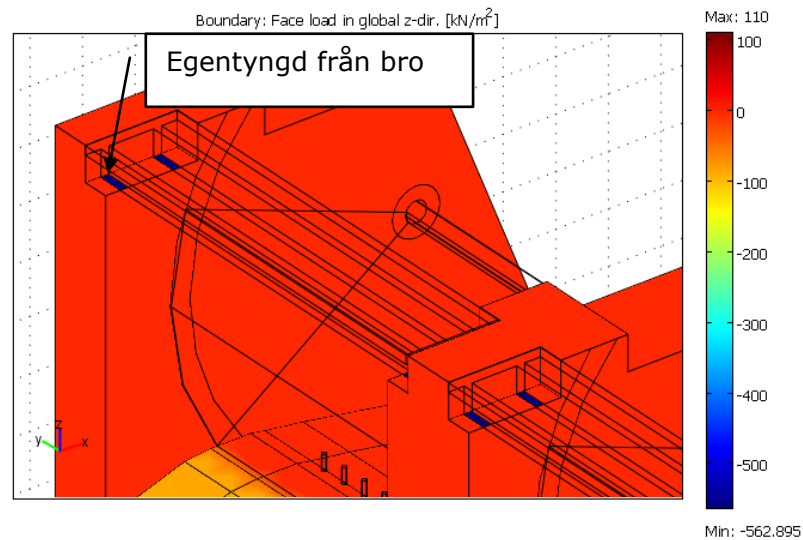
Mesh enligt figur B4.5-1.

I beräkningen ansätts egentyngd, som volymlast och islast, som ytlast, direkt som indata i modellen.

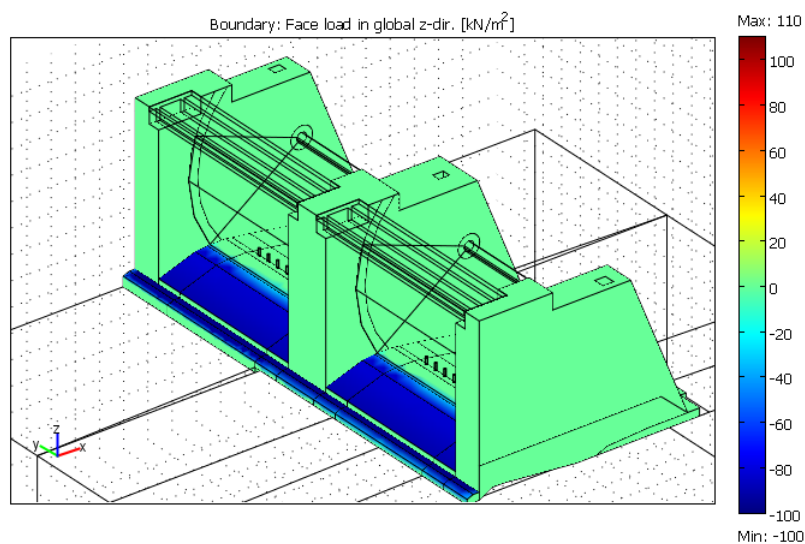
Vattentrycket mot vattensidor och mellan berget och betongen erhålls som ytlast automatiskt från den separata vattenflödesberäkningen, d.v.s. med ekvationer (B4.5-1) – (B4.5-4). Se figurer B4.5-4 t.o.m. B4.5-7.



Figur B4.5-4 Beräknad horisontell ytlast (i x-riktning) i LK1. Endast vattenlast mot utskovet visas. 1) = koncentrerad last från angränsande valvkonstruktion

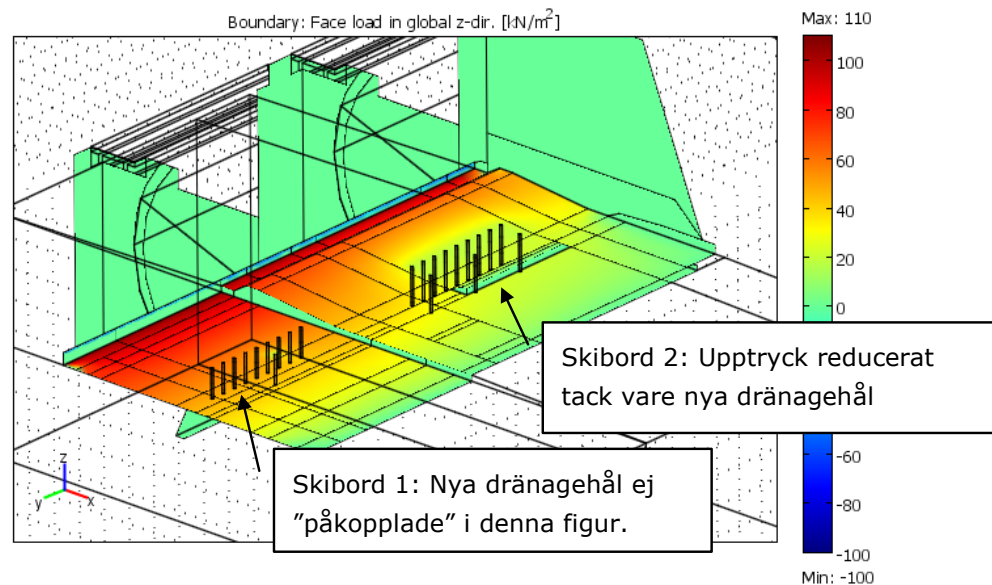


Figur B4.5-5 Egentyngd av bron sätts mot hyllplanen på pelarna



Figur B4.5-6 Beräknad vertikal ytlast (i z-riktning) i LK1

Observera att Figur B4.5-7 visar fallet med nya dränrör under skibord 2, därav lägre upptryck där. De rör som visas i figuren i skibord 1 har satts ej aktiva. Det syns att (grönare färg i figuren) upptrycket minskar under skibord 2 tack vare dränagerören.



Figur B4.5-7 Beräknad ytlast i z-riktning i LK1. Observera att figuren visar fallet med nya dränrör under skiborden. I den visade figuren är bara dränrören under skibord 2 "påkopplade" i modellen, för att visa inverkan av nya dränrör, jämfört med skibord 1

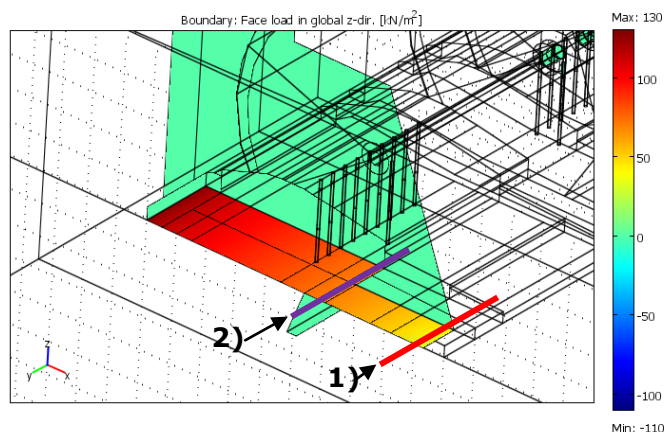
Hela den i figur B4.5-1 visade modellen används för att beräkna porvattentrycket i och under dammen. Däremot, i den mekaniska modellen beräknas stabiliteten för varje enskild del för sig och då är just den delen bara aktiv i den mekaniska beräkningen. T.ex. visas i beräkningen av vänster pelare och då är övriga dammdelar, samt undergrunden, inaktiverade. Pelaren låses fast i y- och z-led längs en linje 1 i n.s.-ändan av resp. monolit, röda linje i Figur B4.5-8, samt i en annan linje 2, lila linje i figuren, strax u.s. den första linjen, i x-, y- och z-riktningen. På pelaren verkar alla ytlaster enligt ovan samt egentyngd av pelaren själv. I figuren syns som exempel ylasten av upptrycket, d.v.s. porvattentrycket i vertikal led.

Beräkningen ger horisontell resultant R_h i linje 2 samt en vertikal R_v i linjer 1 och 2, vilket ger Glidvillkoret R_h/R_v .

I nästa steg ansätts enbart mothållande laster och en R_v i linje 2 beräknas samt likadant för enbart pådrivande laster, vilket ger mothållande och pådrivande moment M_{mot} och $M_{på}$. Stjälpningsvillkoret kontrolleras med $M_{mot}/M_{på}$.

Resultantens läge beräknas som $e = (M_{mot} - M_{på})/R_v$ och kontrolleras i vanligt/exc. lastfall mot $e/L < 0,33/0,20$.

Sammanställning över beräknad stabilitet i exemplet kan ses i Tabell B4.5-1. Gråmarkerade rutor visar var stabilitetsvillkoren ej uppfylls. I detta exempel uppfylls de ej för konstruktionen i befintligt skick 2012. Efter detta så borrades dränagehål genom skibordet och på så sätt minskade upptrycket och stabilitetsvillkoren uppfylldes.



Figur B4.5-8 Val av upplag vid n.s.-ändan (röd linje) och vid resultantens läge Rv (grön linje)).

Tabell B4.5-1 Sammanställning beräknad stabilitet för pelare 1 för olika fall. LK 1 = med islast, LK 2 = nålavstängning, LK 6 = hög övy och nvy

Fall	LK	övy	nvy	Islast	x/L	S	Glidn	1)	2)	Beskrivning	Anm.
		möh	möh	kN/m	≥ 0.33 /0.20	≥ 1.5 /1.35	≤ 0.75 /0.90	%	%		
1	1	300,0	289,0	200	0,31	1,55	0,65	0%			övy=DG och Islast
2	Bef. skick 2012.	2	300,0	289,0	0		1,17	-87%			Nålavst. i skibord 1. Inkl. last från skibord 1 via förtagningar. Endast glidning dimensionerande.
3		6	302,0	292,0	0	0,37	2,04	0,86	-41%		Hög övy och nvy. Stabiliserar skibord 1 via förtagningar.
4		1	300,0	289,0	200	0,34	1,78	0,58	0%		Lika fall 1 men med nya vert. Dränrör.
5	Nya rör 2013	2	300,0	289,0	0		0,69	-48%			Lika fall 2 men med nya vert. dränrör. Stabiliserar skibord 1 via förtagningar.
6		6	302,0	292,0	0	0,36	1,68	0,65	0%		Lika fall 5 men hög övy och nvy.
= understiger RIDAS krav											
1) Andel möjlig kraft till (-) skibord via förtagningar											
2) Andel bef. bergdubb för glidmothåll											

Sammanfattning

Ovanstående exempel kan naturligtvis (nästan) lika gärna beräknas för hand, men fördelen med det visade exemplet är att dels kan porvattentryck beräknas mer nyanserat för mer avancerade geometrier samt att även mer svåra geometrier av betongkonstruktionen kan beräknas. En nackdel kan vara att beräkningen inte är lika lätt att granska som en handberäkning.

4.5-3 Exempel 2 för befintliga konstruktioner – sprickor i utskovspelare

Här visas ett exempel av tillståndskontroll av en sprucken dammpelare. Syftet var att utreda orsaken till sprickorna.

Hypotesen var att det har varit säsongsmässiga temperaturvariationer som orsakat att betongkonstruktionen, en utskovspelare, spruckat sönder.

De beräknade sprickornas antal, utseende och längd jämförs med verkliga sprickor i syfte att finna orsaken till sprickorna.

Spänning-töjningssambandet ges av

$$\sigma = E(\varepsilon - \varepsilon_{th} - \varepsilon_0) + \sigma_0 \quad (B4.5-8)$$

där E = elasticitetsmodulen (Pa); ε = total elastisk töjning (-); ε_{th} = töjning orsakad av temperaturvariationer (-); ε_0 = initieell töjning (-), t.ex. p.g.a. uttorkning, men antas till noll i exemplet; och σ_0 = initieell spänning (Pa), här satt till noll. Termiska töjningar i strukturen beräknas med

$$\varepsilon_{th} = \alpha_c \cdot (T - T_{c0}) \quad (B4.5-9)$$

där α_c = termisk expansionskoefficient (1/°C); T = aktuell temperatur (°C); och T_{c0} = initial temperatur (°C). Temperaturerna i konstruktionen antas direkt ansatt eller beräknad i separat temperaturmod som med ekvation (B4.5-11).

Ekvation (B4.5-8) och (B4.5-9) i ekvation (B4.5-7) ger

$$-\nabla \cdot D(\varepsilon - \alpha_c(T - T_{c0})) = b - \nabla p \quad (B4.5-10)$$

där T = temperaturfält med temperaturmoden; och ∇p = porttrycksgradient beräknad med porttrycksmoden, i exemplet dock satt till noll för själva pelardelen ty vattentryck som randlast antas där istället.

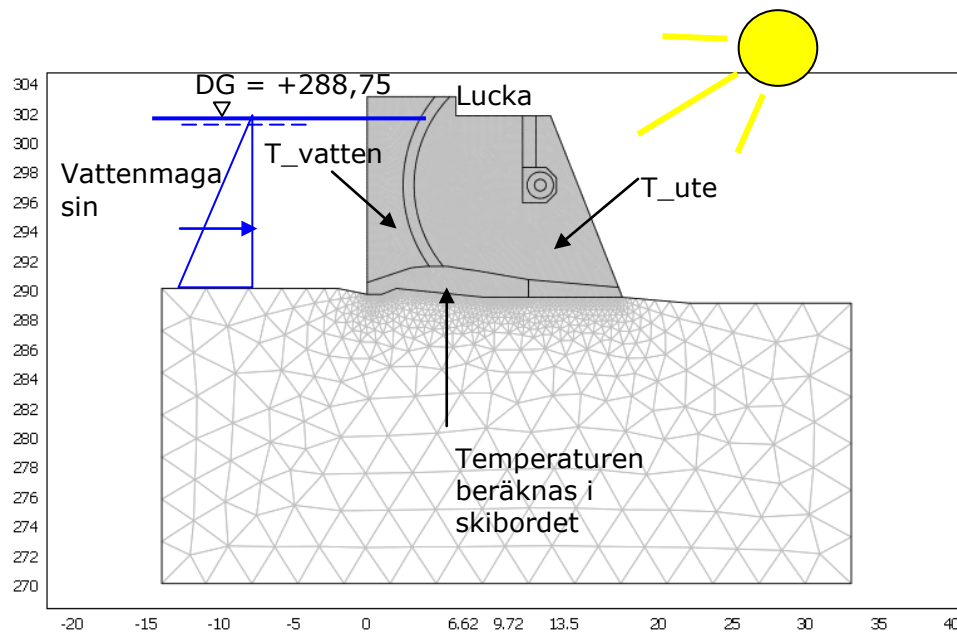
Temperaturen i vatten (T_{vatten}) och luft (T_{ute}) antas enligt Figur B4.5-9 och Figur B4.5-10. Observera att T_{vatten} högst troligen är för högt ansatt på sommaren i exemplet, vilket dock inte påverkar resultatet så mycket.

Mot pelarsidorna ansätts T_{vatten} och T_{luft} direkt.

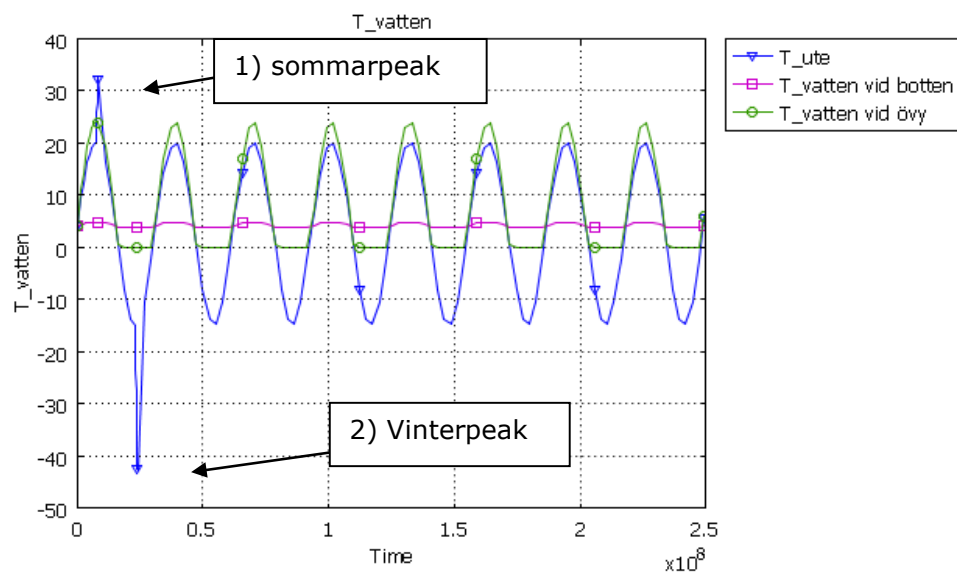
Temperatur i skibord och berg, beräknas med en FEM-formulerad balansekvation (B4.5-11). T_{vatten} och T_{luft} sätts som randvillkor.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q \quad (B4.5-11)$$

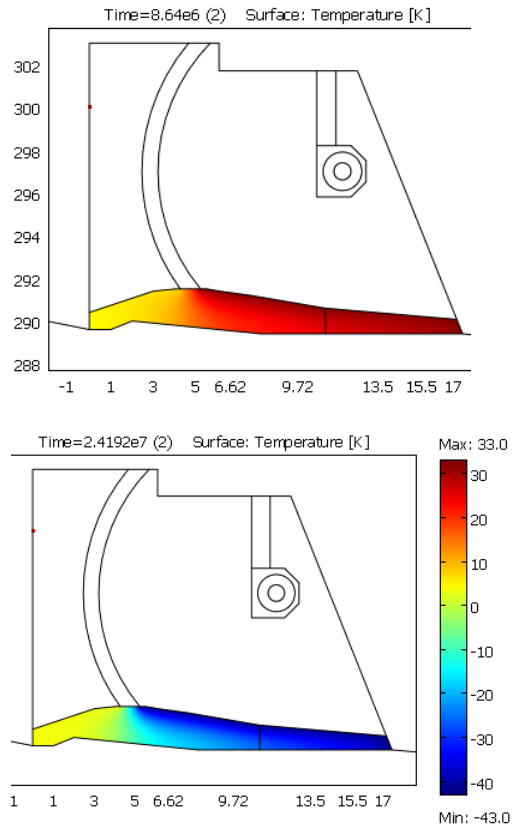
där k = värmekonduktivitet; T = temperatur; Q = värmekälla; C_p = värmekapacitet; u = flöde av mediet. I detta fall sätts $u = 0$ ty ingen konvektivt fördd värme antas genom dammen. I detta fall sätts även $Q=0$ ty ingen värmeförsörjning, t.ex. hydrationsvärme, eller bortföring antas i dammen.



Figur B4.5-9 Använd mesh och geometri för dammpelarna

Figur B4.5-10 Antagna temperaturer mot luftsidan av betong (T_{ute}), mot vattensidor (T_{vatten}) på två olika nivåer, vid botten och vid övy. Mellan övy och botten varierar vattentemperaturen rätlinjigt.

Resultatet från värmeberäkningen för Fall 1 visas i figur B4.5-11 Temperaturerna bearbetas direkt i den mekaniska beräkningen som en volymslast.



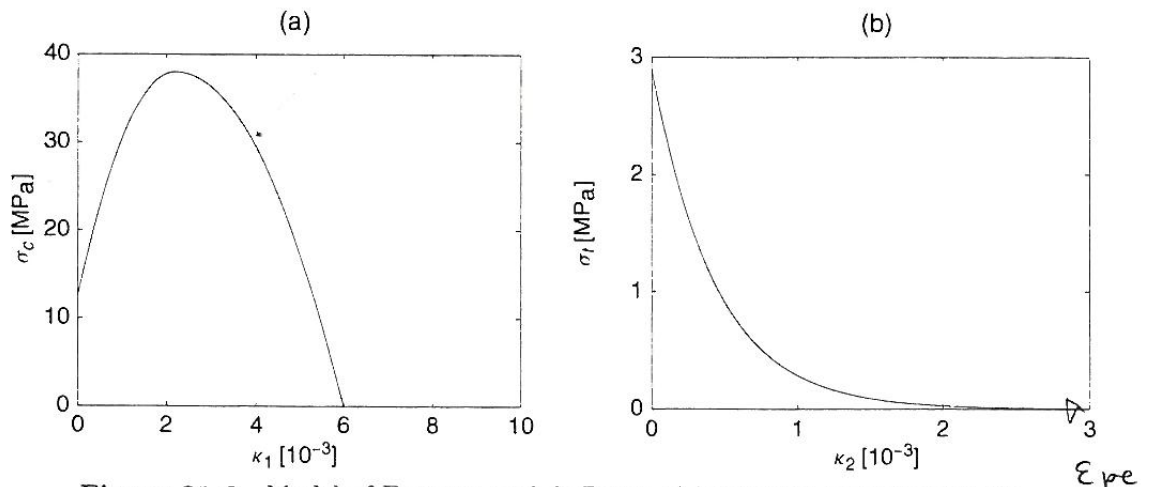
(a) sommar (b) vinter

Figur B4.5-11 Fall 1: Beräknade temperaturer i undre delen av pelaren för sommar respektive vinter första året med extrema utetemperaturer.

Betongen och berget antas i exemplet mjukna efter det att spänningsgränsen F har uppnåtts med en hållfasthet σ enligt ekvation (B4.5-12) och (b), d.v.s. bara för dragbrott och inte för tryckbrott. Detta är i sammanhanget en godtagbar förenkling ty tryckspänningarna är så låga att tryckbrott enligt (a) inte inträffar. Betong är ca 10 ggr starkare i tryck än drag.

$$\sigma = f_c \exp\left(-\frac{\varepsilon_{pe}}{k_{2u}}\right) \quad (\text{B4.5-12})$$

där f_c = tryckhållfastheten (MPa), ε_{pe} = effektiv (ackumulerad) plastisk töjning (-);
och k_2 = faktor varvid hur snabbt mjukningen sker (-).



Figur B4.5-12 Modell av Feenstra och de Borst (1996): a) hårdnande-mjuknande för tryck, b) mjuknande för drag.

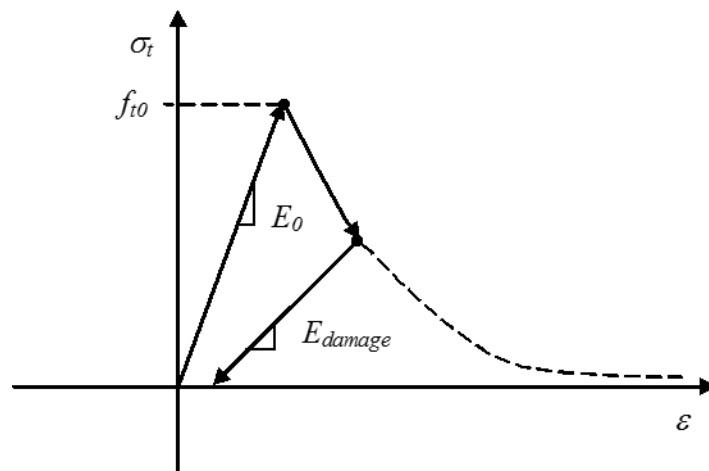
Deformationen hos materialet innanför brottzonen kan bara anges som en absolut deformation och kan inte anges som en relativ deformation. Ett konstgrepp man ofta gör vid beräkningar är att använda sprickbandmodeller där brottzonens längd w relateras till en sprickbandets bredd, h . Sedan kan deformationen w "smetas" ut över denna bredd och man erhåller en fiktiv töjning

$$\varepsilon_{pl} = \frac{w}{h} \quad (\text{B4.5-13})$$

Ju större h desto brantare lutning på den nedåtgående arbetskurvan. "Den nedåtgående kurvan får inte bli hur brant som helst, d.v.s. elementet får inte göras hur stort som helst. Den elastiska energi som för varje ökning av töjning frigörs inom elementet måste vara lägre än den som förbrukas. För att villkoret skall vara uppfyllt, för den typ av kurva som visas i Figur B4.5-13, måste följande villkor vara uppfyllt:

$$h \leq \frac{2EG_F}{f_t^2} = 2l_{ch} \quad (\text{B4.5-14})$$

E = E-modul (Pa); G_F = brottenergi (Nm/m²); l_{ch} = materialets karakteristiska längd och är ca 300 mm för normalbetong, vilken ger den övre gränsen för elementets storlek; och f_t = draghållfasthet (Pa). I praktiken kan betydligt mindre element behöva väljas eftersom den verkliga kurvan är betydligt brantare än lutningen hos den linjära approximationen. Dessutom frigörs elastisk energi från andra närliggande element [2].

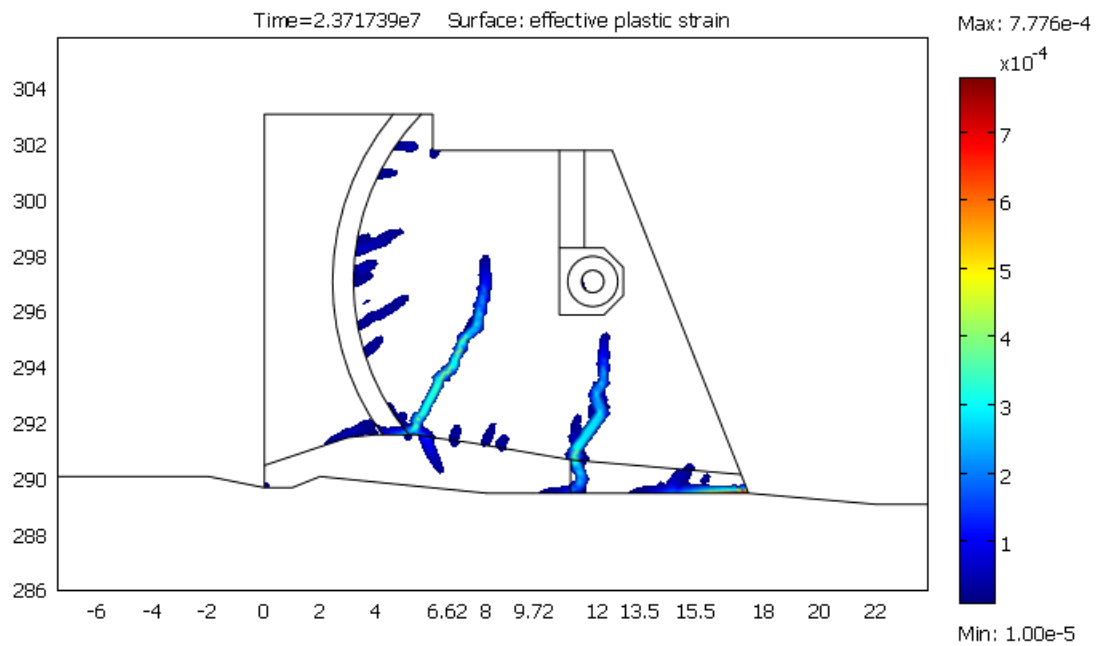


Figur B4.5-13 Antaget mjuknande enligt (ekv 3-20) och skada på E-modulen (ekv. B4.5-15).

E-modulen antas degraderas till E_{damage} när betongen mjuknar, d.v.s. vid avlastning och ny pålastning är E-modulen lägre än den ursprungliga E_0 . Vid varje pålastning som innebär en större ackumulerad plastisk töjning ε_{pe} minskar E-modulen ytterligare enligt ekvation (B4.5-15). Faktorn 10 000 är en anpassning till data från litteraturen.

$$E_{damage} = E_0 \cdot (-\exp(\varepsilon_{pe} \cdot 10000)) \quad (B4.5-15)$$

Beräkningar ger en sprickbild som relativt väl överensstämmer med verkligheten. Den totalt dominerade orsaken till sprickbildningen är temperaturvariationerna som skapar stora dragspänningar i konstruktionen, speciellt under kalla vintrar.



Figur B4.5-14 Beräknade sprickor i utskovspelaren.

Bilaga 6.1: Förslag till innehållsförteckning för dokumentet "Analysförutsättningar"

1. Problemställning
2. Projektets mål och syfte
3. Analysmodell och indata
 - 3.1 Översiktlig beskrivning av val av analysmodell och motiv till detta val
 - 3.2 Yttre påverkningar/laster
 - 3.3 Systemavgränsning och randvillkor
 - 3.4 Modellförenklingar och antaganden
 - 3.5 Materialmodeller och materialparametrar
 - 3.6 Modellosäkerheter
4. Standarder, normer och bestämmelser
5. Övriga informationskällor
6. Analysverktyg
7. Övriga viktiga antaganden och förutsättningar
8. Referenser

Bilaga 6.2: Förslag till innehållsförteckning för dokumentet "Analysrapport"

1. Problemställning
2. Projektets mål och syfte
3. Analysmodell och indata
 - 3.1 Detaljerad beskrivning av val av analysmodell och motiv till detta val
 - 3.2 Yttre påverkningar/laster
 - 3.3 Systemavgränsning och randvillkor
 - 3.4 Modellförenklingar och antaganden
 - 3.5 Materialmodeller och materialparametrar
 - 3.6 Redovisning av osäkerheter
4. Numerisk approximation och konvergenskriterier
5. Analysresultat
6. Kontroller av resultatens tillförlitlighet
7. Utvärdering och tolkning av analysresultat
8. Slutsatser
9. Referenser

GRANSKNING AV BERÄKNINGAR I BETONGKONSTRUKTIONER

Här ges praktisk vägledning för såväl den som ska beställa som den som ska granska avancerade datorbaserade beräkningar i vattenkraftens betongkonstruktioner. Beräkningarna är baserade på finita elementmetoden eller motsvarande för analyser av mekanik och transportmekanismer i anläggningskonstruktioner av betong i vattenkraftkonstruktioner.

Begreppet mekanik inkluderar här spänningar, deformationer, hållfasthet, brott och sprickbildning. Begreppet transportmekanismer inkluderar mass- och värmeflöde i betongen.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se



Energiforsk