UPPSALA UNIVERSITET

UPTEC ES 25010
Examensarbete 30 hp
Juni 2025

Sannolikhetsbaserade dammhaveriberäkningar i fyllningsdammar

Lina Gudmundsson

Civilingenjörsprogrammet i energisystem

UPPSALA UNIVERSITET

Probability Based Dam Breach Calculations for Embankment Dams

Lina Gudmundsson

Abstract

Dam breach modelling is associated with significant uncertainties due to the complex and often unpredictable nature of breach development. This thesis explores the application of probabilistic methods to simulate breach scenarios for embankment dams, aiming to assess how these methods can improve risk assessments and decision-making within dam safety evaluations. Using Monte Carlo simulations in the two software Breacher and Embrea, two dam failures were analyzed. For each case, many stochastic simulations were conducted, varying dam breach parameters such as breach bottom width and breach time within defined intervals. The analysis focused on the resulting probabilistic distribution of outflow hydrographs and peak flows, as well as identifying key sensitivities and uncertainties. The results show that probabilistic methods can help to visualize uncertainty through percentile-based analyses and distribution plots. This supports a more transparent assessment of possible outcomes compared to traditional deterministic methods. It was further found that the choice of probability distribution has limited influence on results, while the assumed parameter intervals are critical. Limitations were mainly linked to the practical usability of the software and the inability to integrate stochastic output into hydrodynamic flood models. Nevertheless, the findings highlight a strong potential for probabilistic methods to complement and enhance traditional dam breach assessments by enabling better risk communication, parameter sensitivity evaluation and uncertainty quantification.

Teknisk-naturvetenskapliga fakulteten

Uppsala universitet, Utgivningsort Uppsala

Handledare: Pierre-Louis Ligier Ämnesgranskare: Urban Lundin

Examinator: Petra Jönsson

Populärvetenskaplig sammanfattning

Sannolikhetsbaserade dammhaveriberäkningar för fyllningsdammar

Lina Gudmundsson

Vattenkraft är världens största källa till förnybar energi. I Sverige str den för ungefär hälften av all elproduktion och spelar en nyckelroll i övergången till ett fossilfritt energisystem. För att kunna lagra vatten och styra elproduktionen byggs vattenkraftsdammar. I Sverige finns tusentals sådana, och globalt sett ännu fler. Men även om vattenkraften i sig är hållbar är den inte utan risker. Dammar är stora tekniska konstruktioner, och om de skulle brista kan konsekvenserna bli mycket allvarliga.

När en damm brister, eller *havererar*, frigörs enorma mängder vatten på kort tid. Den flodvåg som uppstår kan riva med sig vägar, byggnader och ibland hela samhällen. För att kunna skydda liv, infrastruktur och miljö är det därför avgörande att kunna förutse hur ett sådant händelseförlopp skulle kunna se ut. Det är här dammhaveriberäkningar kommer in. De kan exempelvis förutsäga hur snabbt dammen skulle brista, hur bred öppningen skulle bli och hur stora vattenflöden som skulle uppstå. Sådana beräkningar används som grund för riskanalyser, dammsäkerhetsklassificeringar och dammsäkerhetsutredningar. Problemet är att dessa beräkningar ofta är förknippade med stora osäkerheter. Detta beror på att det finns ett stort antal faktorer, så kallade *dammhaveriparametrar*, som påverkar ett dammhaveriförlopp och som är svåra att uppskatta.

Traditionellt bygger dammhaveriberäkningar på fasta antaganden om dessa parametrar, som till exempel hur lång tid det tar för dammen att brista eller hur stor öppningen i konstruktionen blir. De här antagandena baseras ofta på tidigare observationer från liknande dammar som havererat, eller utifrån olika förenklade ekvationer som tagits fram med hjälp av historisk data. Parametrarna matas in som fasta värden i modellerna, ofta valda med stor försiktighet för att vara på den säkra sidan och inte underskatta hur allvarliga följderna skulle kunna bli. Resultatet blir ett enskilt scenario. Men hur tillförlitligt det scenariot är beror helt på vilka värden användaren valt, värden som dessutom är väldigt osäkra. I praktiken speglar därför beräkningarna inte ett verkligt förlopp, utan bara ett av många möjliga. För att fånga hela spannet av möjliga utfall, och för att tydliggöra variationer, osäkerheter och känsliga faktorer i beräkningarna, kan sannolikhetsbaserade metoder vara ett bättre alternativ.

Genom att låta flera av dessa osäkra parametrar variera slumpmässigt i ett stort antal simuleringar, går det att skapa en bild av hur många olika sätt ett dammhaveri faktiskt kan utvecklas på. Istället för ett enda svar får man en spridning av möjliga resultat, där man kan se både vad som är mest sannolikt och vad som är mest extremt. Dessutom blir det möjligt att identifiera vilka parametrar som påverkar resultaten mest.

I det här arbetet används två dammhaverier som fallstudier. Det ena är det verkliga dammhaveriet av Tousdammen i Spanien 1982. Det var en stor jordfyllningsdamm som brast efter att intensiva regn gjorde att vattennivån steg snabbt, och dammens avbördningskapacitet inte räckte till. Det andra är ett kontrollerat fälttest som genomfördes i Norge 2002, där en mindre damm medvetet utsattes för en stor flodvåg för att kunna studera hur ett dammhaveriförlopp utvecklas. Båda fall har modellerats med hjälp av två olika beräkningsprogram som klarar av att göra sannolikhetsbaserade simuleringar: Breacher och Embrea.

Breacher visade sig vara användarvänligt och stabilt, med tydlig och tillgänglig dokumentation. Programmet sparar data från varje enskild simulering vilket gör det möjligt att illustrera utflö-

deskurvor och analysera variationer i resultatet. Embrea bygger på mer avancerade fysikaliska modeller, men upplevdes ha begränsningar när det gäller användarvänlighet och robusthet vid sannolikhetsanalyser. Tillsammans har programvarorna ändå gett en god grund för att undersöka hur sannolikhetsbaserade metoder kan komplettera dagens traditionella beräkningar. Genom att ta fram utflödeskurvor som visar ett stort antal möjliga dammhaveriförlopp, och samtidigt identifiera vilka parametrar som är mest osäkra eller de som har störst påverkan, kan resultaten användas som ett mer mångsidigt och transparent beslutsunderlag.

Resultaten visar att det framför allt är variationsintervallen för de osäkra parametrarna snarare än exakt hur deras fördelning ser ut som styr hur mycket resultaten i sin tur varierar. Två parametrar visade sig vara särskilt känsliga: bredden på botten av öppningen och tiden det tar för förloppet att utvecklas. Hur viktiga dessa är beror på hur stort dammens vattenmagasin var. Förutom detta visades vilka resultat som är mer osäkra eller orimliga. Till exempel gör det sannolikhetsbaserade resultatet det möjligt att kunna koppla olika största möjliga vattenflöden till olika sannolikheter, vilket ger en tydligare bild av vilka scenarier som är mest troliga.

Sammantaget visar arbetet att sannolikhetsbaserade dammhaveriberäkningar inte bara kompletterar dagens beräkningar genom att bidra med mer heltäckande analyser och till ett mer transparent beslutsunderlag, utan också ger ett verktyg för att kvantifiera osäkerheter och identifiera vilka parametrar som har störst betydelse för konsekvenserna av ett potentiellt dammhaveri. Genom att synliggöra och hantera osäkerheter som en naturlig del av beräkningarna, istället för att försöka dölja dem bakom försiktiga antaganden, kan dessa metoder bli en naturlig och viktig pusselbit i framtidens dammsäkerhetsarbete.

Exekutiv sammanfattning

Sannolikhetsbaserade dammhaveriberäkningar för fyllningsdammar

Lina Gudmundsson

Examensarbetet syftar till att tillämpa probabilistiska metoder i dammhaveriberäkningar och undersöka deras potential att förbättra underlaget vid praktiska tillämpningar som dammsäkerhetsklassificeringar och beredskapsplanering. Istället för att förhålla sig till enstaka och konservativa antaganden, behandlas osäkra parametrar som stokastiska variabler inom specificerade sannolikhetsintervall- och fördelningar. Beräkningar har genomförts i programvarorna Breacher och Embrea som båda möjliggör Monte Carlo-beräkningar. I den parametriska modellern Breacher ligger fokus på parametrar kopplade till bräschutvecklingen, såsom slutlig bräshbredd och utvecklingstid, i den fysikaliskt baserade modellen Embrea är det istället på parametrar för materialegenskaper.

Två fallstudier har använts: det verkliga dammhaveriet av Tousdammen i Spanien 1982 och ett fälttest i Norge 2002. Beräkningarna i Breacher visade goda möjligheter för probabilistiska tillämpningar, Embrea däremot var mer svårtillämpad, med bristfällig dokumentation och möjligheter till felsökning. Resultaten visar att valda variationsintervall har större inverkan på utflödesberäkningarna än den valda sannolikhetsfördelningen, och att resultaten av dammhaveriberäkningarna är särskilt känsliga för bräschens slutligt uppnådda bottenbredd, samt dess utvecklingstid beträffande dammar med mindre magasinvolym. Dessutom exemplifieras hur beräkningarna ger underlag för att med hjälp av percentilanalyser och olika fördelningsdiagram kunna kvantifiera resultatens osäkerheter. Sannolikhetsbaserade dammhaveriberäkningar kan på detta sätt skapa ett mer transparent och robust beslutsunderlag jämfört med traditionella deterministiska analyser, och genom sitt bidrag stärka det framtida dammsäkerhetsarbetet.

Tillkännagivande

Först och främst vill jag rikta ett stort tack till min handledare på Sweco, Pierre-Louis Ligier, för all vägledning och värdefulla återkoppling, samt det stora engagemang och stöd som getts genom hela arbetet. Hans expertis och genuina vilja att utveckla detta arbete till något meningsfullt och välgrundat har varit ovärderligt för både denna rapport och min personliga utveckling.

Jag vill även tacka min gruppchef på Sweco, Anna Risberg, för uppmuntran och möjligheten att genomföra examensarbetet inom ett så relevant och spännande område. Ett särskilt tack riktas också till Energiforsk, som genom sitt finansiella stöd bidragit till handledningen och därmed möjliggjort detta examensarbete. Jag vill också tacka James Yang (Vattenfall R&D, Älvkarleby, och KTH, Stockholm) för hans generositet i att dela med sig av både litteratur och underlag, samt Kyle Thomson (Forward Hydro, Australien) och Mohamed Hassan (HR Wallingford, Storbritannien) som bidragit med vägledning och svar på modelltekniska frågor.

Tack till min ämnesgranskare vid Uppsala universitet, Urban Lundin, samt till min opponent Agnes Lindberg, vars värdefulla synpunkter har hjälpt mig att ytterligare utveckla arbetet.

Ett stort tack till er alla!

Uppsala, juni 2025
Lina Gudmundsson

Ordlista

Nedan följer en ordlista av återkommande termer i rapporten och dess respektive förklaring.

Teknisk term	**Förklaring**
Avbördning	Process där vatten avleds från ett vattenkraftmagasin eller dammområde, ofta genom en utskovsdamm eller utskov, för att kontrollera vattennivåer och förhindra översvämningar.
Bräsch	Den öppning som uppstår i en damm som havererar.
Damm	En konstruerad fördämning av vatten, exempelvis fyllningsdamm eller betongdamm.
Dammhaveri	Då en damm brister och leder till ett plötsligt och okontrollerat utflöde av vatten, synonym för den äldre vedertagna termen dammbrott.
Deterministisk modell	Resultatet är bestämt av tidigare orsaker eller initiala villkor utan någon form av slumpmässighet eller osäkerhet.
Digital terrängmodell	En digital representation av markytans höjdvariationer i ett område, ofta baserad på mätdata från flyg- eller satellitbilder.
Empirisk	Kunskap/data som baseras på observationer, erfarenheter eller experiment.
Erosionsmodell	Metod för att förutsäga och analysera markens erosion orsakad av naturliga faktorer som vatten och vind.
Friktionsjord	Jord vars hållfasthet huvudsakligen byggs upp av friktionskrafter mellan jordkornen, till exempel sand eller grus.
Friktionsvinkel	Mått på jordens hållfasthet, anger hur brant en slänt kan vara innan materialet börjar rulla.
Fyllningsdamm	En damm uppbyggd av jord eller sten. Dessa dammar är inte helt täta vilket innebär att de har viss genomsläpplighet och därmed läckage av vatten.
Fördelningsfunktion	En matematisk funktion som anger sannolikheten att en stokastisk variabel antar ett värde mindre än eller lika med ett visst tal.
Gravitationsvåg	En våg i vatten som skapas enbart genom gravitationens inverkan, till exempel då vattennivåer förändras.
Hydraulisk radie	Förhållandet mellan den våta tvärsnittsarean och våta omkretsen i en strömförande kanal.
Hydrograf	En kurva som visar variationen av vattenflöde eller vattennivå över tid vid en viss plats i ett vattendrag eller vattenmagasin.
Hydrologi	Vetenskaplig term för att beskriva studier av vattnets kretslopp genom vatten, mark och luft.
Inre erosion	Oönskad process där vatten tränger in och transporterar material genom fyllningsdammen, ofta på grund av brister i grundläggning, konstruktion eller tätskikt, som i värsta fall kan orsaka dammhaveri.

Kohesionsjord	Jordtyp som har fysikaliska attraktionskrafter mellan molekylerna i jorden vilket gör att materialet kan hålla ihop utan enbart friktion, exempelvis lera.
Laminärt flöde	Förekommer vid låga Reynolds-tal, de viskösa krafterna är stora jämfört med tröghetskrafterna och flödet följer parallela linjer utan att blandas.
Linjär regression	Anpassar observerad data med ett linjärt samband.
Magasin	Vattenansamling uppströms en damm som används för att lagra vatten, till exempel för energiproduktion eller dricksvatten.
Monte Carlo	Statistisk metod som använder slumpmässiga samplingar för att skapa flera möjliga utfall och räkna ut det genomsnittliga resultatet.
Morän	En jordart bestående av osorterat material som transporterats och avlagrats av en glaciär.
Nedströms	Beskriver en lokalisering nedanför eller efter något annat i vattendragets flödesriktning, exempelvis nedanför en damm.
Normalfördelning	Sannolikhetsfördelning där de flesta observationsvärden ligger runt medelvärdet, få längre ifrån medelvärdet och knappt några värden alls långt ifrån medelvärdet.
Porositet	Andelen tomrum i en jord- eller bergart i förhållande till dess totala volym.
Probabilistisk modell	Resultaten kan förutsägas i form av sannolikhet.
Regressionsanalys	Statistisk metod för att hitta en funktion som bäst överensstämmer med observerad data och beskriver sambandet mellan en beroende variabel och en eller flera oberoende variabler.
Sannolikhetsfördelning	En funktion som beskriver hur sannolikheten för olika utfall är fördelad för en stokastisk variabel.
Siktkurva	En graf som visar ett jordmaterials viktprocent i förhållande till partikelstorlek.
Skjuvspänning	Den kraft per ytenhet som verkar parallellt med en yta.
Stokastisk modell	Syftar till stokastisk variabel. Resultatet beror på slumpmässiga variabler och är osäkra och kan variera för samma initiala villkor.
Stokastisk variabel	Funktion definierad på ett utfallsrum och antar värden som varierar slumpmässigt, kan vara diskret eller kontinuerlig.
Strömmande flöde	Djupt och långsamtflytande vattendrag, definieras av ett lågt Froudes tal.
Stråkande flöde	Grundare vattendrag med hög vattenhastighet, definieras av ett högt Froudes tal.
Torrtunghet	Förhållandet mellan kornens tyngd och den totala volymen av ett material.
Topografi	Information om markens yta och dess höjdvariationer.
Trappstegserosion	Erosionsprocess där markytan nöts bort i stegvis formade nivåer, ofta längs sluttningar eller i flodkanter.

Turbulent flöde	Förekommer vid höga Reynolds-tal, de viskösa krafterna är små jämfört med tröghetskrafterna och flödet rör sig oregelbundet och virvlande med blandning mellan lager.
Uppströms	Beskriver en lokalisering ovanför eller tidigare något annat i vattendragets flödesriktning, exempelvis ovanför en damm.
Utfallsrum	Mängden av alla möjliga resultat eller utfall för ett slumpmässigt försök.
Utskov	Konstruktionsdel som används för att leda om eller avbörda vatten på säkert sätt från en damm.
Utströmningshydrograf	Grafisk representation av hur vattenflödet från en damm förändras över tid, vilket visar mängden vatten som strömmar från systemet.
Väntevärde	Detsamma som medelvärde för ett stort antal slumpmässiga försök.
Viskositet	Ett fysikaliskt mått på en vätskas inre motstånd mot flöden, betecknande dess ”tjockhet”.
Yterosion	Erosionsprocess där materialytan gradvis nöts bort av yttre krafter som vatten, vind eller is.
Ytråhet	Ytstruktur på mikroskopisk nivå som påverkar friktion och flödesegenskaper.
Överströmning	När tillrinningen till en damm överskrider avbördnings- och/eller magasinkapaciteten, vilket resulterar i att vatten rinner över dammen.

Innehåll

1 Inledning **1**
1.1 Syfte . . . 1
1.2 Frågeställningar . . . 2
1.3 Avgränsningar . . . 2

2 Teori **3**
2.1 Sannolikhetsteori för dammhaveriberäkningar . . . 3
2.1.1 Monte Carlo-beräkningar och dess betydelse för dammhaveriberäkningar 3
2.1.2 Sannolikhetsfördelningar . . . 4
2.1.3 Likformig fördelning . . . 5
2.1.4 Normalfördelning . . . 5
2.1.5 Triangulär fördelning . . . 6
2.2 Fyllningsdammar . . . 7
2.2.1 Zonindelad fyllningsdamm . . . 7
2.2.2 Jordegenskaper och erosionsmekanismer . . . 8
2.2.3 Dammhaveri i fyllningsdammar . . . 9
2.3 Beräkningsteori . . . 9
2.3.1 Hydrauliska parametrar . . . 10
2.3.2 Hydrauliska beräkningar . . . 11
2.3.2.1 Analytiska beräkningsmetoder . . . 11
2.3.2.2 Numeriska beräkningsmetoder . . . 11
2.3.2.3 Magasinsberäkningar . . . 12
2.3.3 Sedimenttransportberäkningar . . . 12
2.3.3.1 Bottenskjuvspänning . . . 12
2.3.3.2 Sedimenttransportberäkningar . . . 13
2.3.4 Beräkningsmodeller för förutsägning av bräschutveckling vid dammhaveri 13
2.3.4.1 Empiriska ekvationer . . . 13
2.3.4.2 Parametriska beräkningsmodeller . . . 14
2.3.4.3 Fysiskt baserade beräkningsmodeller . . . 15

3 Metod **16**
3.1 Val av beräkningsprogram . . . 16
3.1.1 Breacher . . . 16
3.1.2 Embrea . . . 17
3.1.3 Mike+ . . . 17
3.1.4 Nödvändiga dammhaveriparametrar för valda beräkningsprogram . . . 18
3.2 Val av historiska dammhaveridata för beräkningar . . . 19
3.2.1 Fallstudie 1: Tousdammen . . . 19
3.2.1.1 Uppskattning av Tousdammens dammhaveriparametrar . . . 20
3.2.1.2 Tidigare bräschmodellering av Tousdammen . . . 23
3.2.2 Fallstudie 2: Fälttestdamm 2-2002 . . . 24
3.2.2.1 Uppskattning av fälttest 2-2002:s dammhaveriparametrar . . . 25
3.3 Beräkningsmetodik . . . 27
3.3.1 Fallstudie 1: Tousdammen . . . 27
3.3.1.1 Breacher . . . 27
3.3.1.2 Embrea . . . 28
3.3.1.3 Mike+ . . . 29
3.3.2 Fallstudie 2: Fälttest 2-2002 . . . 29

3.3.2.1 Breacher . . . 29
3.3.2.2 Embrea . . . 30

4 Resultat **31**
4.1 Fallstudie 1: Tousdammen . . . 31
4.1.1 Deterministiska beräkningar . . . 31
4.1.2 Stokastiska beräkningar . . . 33
4.2 Fallstudie 2: Fälttest 2-2002 . . . 41
4.2.1 Deterministiska beräkningar . . . 41
4.2.2 Stokastiska beräkningar . . . 43

5 Diskussion **49**
5.1 Fallstudie 1: Tousdammen . . . 49
5.2 Fallstudie 2: Fälttest 2-2002 . . . 51
5.3 Känslighetsanalys . . . 52
5.4 Sammanfattande diskussion . . . 53

6 Slutsatser **55**

Bilaga A Breacher **59**
A.1 Setup-filer . . . 59
A.2 Python-script för plottar . . . 62

Bilaga B Embrea **70**
B.1 Setup-filer . . . 70
B.2 Pythonscript för plottar . . . 70

Bilaga C Mike+ **71**
C.1 Python-script för plottar . . . 71

1 Inledning

Den vanligaste typen av dammar globalt är fyllningsdammar, det vill säga dammar som består av jord och sten (Ashraf et al., 2018). En viktig och central del i förvaltningen av en fyllningsdamm, precis som för alla dammar, är att säkerställa dammsäkerheten och därigenom förhindra ett eventuellt haveri. Ett dammhaveri innebär att en damm brister och orsakar en plötslig och okontrollerad avbördning (Svenska kraftnät, 2023b). Konsekvenserna av ett sådant haveri kan vara förödande; det kan resultera i omfattande skador på infrastruktur, leda till allvarliga miljöeffekter samt innebära en risk för människoliv (ibid.). Med hänsyn till detta är det avgörande att noggrant utreda vilka konsekvenser som kan uppstå vid ett eventuellt dammhaveri. Beroende på den sammanlagda samhälleliga omfattningen av konsekvenserna fastställs därtill vilken dammsäkerhetsklass den ska klassificeras inom, vilket i sin tur avgör kraven på bland annat dammens dimensionering, tillsyn och övervakning (Regeringskansliet, 2013). Konsekvensutredningen utgör även en viktig grund för beredskapsplanering, där dammägarens ansvar är att förebygga och minimera negativa samhällskonsekvenser av ett dammhaveri (Svenska kraftnät, 2018).

För att utreda konsekvenserna av ett potentiellt dammhaveri och tillhandahålla underlag för dammsäkerhetsklassificeringar, dammsäkerhetsutvärderingar och riskanalyser är dammhaveriberäkningar nödvändiga (Sammen et al., 2017). Dessa beräkningar bygger på antaganden om centrala parametrar för haveriförloppet vilka vanligtvis bestäms utifrån fördefinierade parametrar eller genom användning av etablerade erosionsmodeller för bräschens, det vill säga dammöppningens, utveckling (Sammen et al., 2017; Svenska kraftnät, 2023a; Říha et al., 2020; Macchione et al., 2023; Azmi & Thomson, 2024; Wahl et al., 1998; Goodell, u.å., Pierce et al., 2010 m.f). Dessa antaganden är dock vanligtvis svåra att definiera vilket medför betydande osäkerheter i beräkningarna. Begränsad tillgång till dokumentation och data från faktiska dammhaverier försvårar valet av realistiska parametrar. Dessutom påverkas varje enskild parameter av flera faktorer – såsom dammens utformning, magasinerad vattenvolym och rådande hydrologiska förhållanden – vilket ytterligare bidrar till osäkerheten i resultaten (ibid.).

Osäkerheterna i dammhaveriberäkningar kan inte undvikas helt, men det är av stor vikt att de uppskattas och redovisas på ett transparent och strukturerat sätt. Ett sätt att hantera dessa osäkerheter är att tillämpa probabilistiska metoder. Genom att definiera indata till dammhaveriberäkningar enligt statistiska sannolikhetsfördelningar, snarare än att enbart förlita sig på konservativa antaganden, kan dammhaveriutredningar som täcker ett bredare spektrum av antaganden genomföras. Detta gör det möjligt att identifiera det mest sannolika haveriutfallet och tydliggöra vilka osäkerheter som finns, vilket i sin tur stärker underlaget för att bedöma och vidta nödvändiga säkerhetshöjande åtgärder och därmed förbättra dammsäkerheten. Mot denna bakgrund genomförs i detta examensarbete en tillämpning av probabilistiska dammhaveriberäkningar, med målet att undersöka hur sannolikhetsbaserade resultat kan användas för att stödja riskbedömningar och förbättra beslutsunderlag inom dammsäkerhet. Vidare analyseras vilka begränsningar som föreligger vid tillämpning av probabilistiska metoder inom dammhaveriberäkningar, samt i vilken mån valet av sannolikhetsfördelningar för indata kan påverka resultaten.

1.1 Syfte

Syftet med examensarbetet är att tillämpa probabilistiska metoder för att genomföra dammhaveriberäkningar i fyllningsdammar, samt att undersöka i vilken utsträckning dessa metoder kan förbättra arbetet med dammhaveriberäkningar och analysen av de konsekvenser ett potentiellt dammhaveri kan medföra.

1.2 Frågeställningar

- Hur kan probabilistiska metoder tillämpas i dammhaveriberäkningar för fyllningsdammar?
- Hur påverkar valet av sannolikhetsfördelningar för olika dammhaveriparametrar resultatet och nyttan av dessa metoder?
- Vilken potential har probabilistiska metoder för praktisk tillämpning inom dammhaveriberäkningar, och vilka begränsningar föreligger?

1.3 Avgränsningar

Examensarbetet avgränsas till att undersöka hur probabilistiska metoder kan implementeras i dammhaveriberäkningar med hjälp av programvarorna Embrea och Breacher. Analysen begränsas till två historiska fallstudier av dammhaveri, som i rapporten benämns som fallstudie 1 och fallstudie 2. Resultaten i fallstudie 1 jämförs även med motsvarande beräkningar i Mike+. Resultaten utvärderas utifrån de beräknade utströmmande hydrograferna och spridningen av tillhörande parametrar.

2 Teori

Dammhaveriberäkningar kan göras med många olika hydrauliska modellverktyg för att simulera ett dammhaveri och illustrera den resulterande flodvågen nedströms. Hydrauliska beräkningar är nödvändiga för att i detalj analysera vilka konsekvenser som riskerar att inträffa vid ett dammhaveri och således ger de ett bra underlag för dammsäkerhetsklassificering och beredskapsplanering. Ofta genomförs hydrauliska beräkningar av dammhaveri som ett tidsberoende dammhaveriförlopp där så kallade dammhaveriparametrar bestäms i förväg, eller som ett erosionsbaserat dammhaveriförlopp där parametrar istället beräknas fram med hjälp av erosionsmodeller (se avsnitt 2.3.4). Främst beror dammhaveriförloppet av följande dammhaveriparametrar:

- Bräschens slutliga bottenbredd.
- Bräschens slutliga bottenivå.
- Bräschens slutliga sidolutning.
- Bräschens utvecklingstid, vilken definieras som tiden från bräschens initiering till fullständig utveckling.

Gemensamt för samtliga dammhaveriberäkningar är att osäkerheterna är stora till följd av att dessa dammhaveriparametrar är svåra att uppskatta för ett dammhaveriförlopp. Parametrarna beror på ett stort antal olika faktorer, såsom dammtyp, hydrologiska förhållanden, orsak till haveri, topografiska förhållanden med mera. Att modellera ett dammhaveri är således en komplex uppgift där de innefattande osäkerheterna är viktiga att uppskatta för att bedöma resultatets trovärdighet. Ett möjligt sätt att hantera dessa osäkerheter på är genom Monte Carlo-simuleringar (Apel et al., 2006; Peter et al., 2018; Ahmadisharaf et al., 2016), vilket mer utförligt beskrivs i avsnitt 2.1.1.

2.1 Sannolikhetsteori för dammhaveriberäkningar

Sannolikhetsbaserade dammhaveriberäkningar bygger på att dammhaveriparametrarna definieras enligt stokastiska sannolikhetsfördelningar. Dessa matematiska fördelningar beskriver hur en stokastisk variabel förväntas variera inom ett givet utfallsrum (Blom et al., 2005). De utgör därmed en central del i metoder som Monte Carlo-simuleringar. I detta examensarbete används sannolikhetsfördelningar för att tilldela dammhaveriparametrar sannolikheter av möjliga värden, vilket innebär att samtliga tänkbara parametervärden beaktas samt att kvantifieringen av osäkerheter i beräkningarna förenklas.

2.1.1 Monte Carlo-beräkningar och dess betydelse för dammhaveriberäkningar

Monte Carlo-simuleringar kan användas för att generera sannolikhetsfördelningar av modellresultat (West et al., 2018). Genom att slumpmässigt variera indata och upprepa beräkningarna ett stort antal gånger erhålls en fördelning av möjliga utfall, vilket möjliggör en kvantitativ analys av osäkerheter och deras inverkan på resultaten (Peter et al., 2018; Ahmadisharaf et al., 2016; Teal & Wahlin, 2024; Goodell, u.å.; Říha et al., 2020). Vid dammhaveriberäkningar tillämpas detta genom att flera dammhaveriparametrar behandlas som oberoende stokastiska variabler enligt definierade sannolikhetsfördelningar. Genom att upprepa simuleringarna ett stort antal gånger kan en fördelning av utfall erhållas, där särskilt fokus ligger på fördelningen av resulterande utflödeshydrografer nedströms dammen samt deras respektive maximala dammhaveriflöde, vilket hädanefter enbart benämns som maxflöde.

För att identifiera värsta möjliga haveriscenario används traditionellt deterministiska metoder där varje parameter ges ett extremvärde enligt en försiktighetsprincip (Goodell, u.å.; Říha et al., 2020). Denna strategi tenderar dock att ge upphov till scenarier med mycket låg sannolikhet, vilket kan leda till överdimensionerade skyddsåtgärder och onödiga kostnader vid avstängning av samhällsviktig infrastruktur under ett potentiellt haveri. Genom att istället använda en probabilistisk metod, där parametrarna varieras oberoende enligt sina sannolikhetsfördelningar, kan konsekvenserna av ett dammhaveri studeras med ett större spann av möjliga utfall (ibid).

2.1.2 Sannolikhetsfördelningar

En sannolikhetsfördelning, eller mer formellt en fördelningsfunktion, betecknas

$$F_X(x) = P(X \leq x), -\infty < x < \infty \tag{1}$$

där $P(X \leq x)$ beskriver sannolikheten att den stokastiska och *diskreta* variabeln X antar ett värde mindre än eller lika med det för ett specifikt utfall, x (Blom et al., 2005). En fördelningsfunktion är lika med 0 om x är tillräckligt litet, och lika med 1 om x är tillräckligt stort, det vill säga:

$$F_X(x) \rightarrow \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad \text{då} \quad x \rightarrow \begin{cases} -\infty \\ \infty \end{cases}$$

Om utfallen ligger oändligt tätt är den stokastiska variabeln X *kontinuerlig* och en sannolikhetsfunktion P kan i detta fall inte bestämmas. Istället beskrivs fördelningsfunktionen F beskrivs utifrån täthetsfunktionen av X enligt:

$$F_X(x) = \int_{-\infty}^{x} f_X(t)dt \tag{2}$$

Fördelningsfunktionen kan således grafiskt tolkas som arean under täthetsfunktionen från minus oändligheten upp till x, och anger sannolikheten att en stokastisk variabel X antar ett värde mindre än eller lika med ett givet värde x. Inom sannolikhetsteorin är percentilerna $x_{0,25}$ (den nedre kvartilen), $x_{0,5}$ (medianen) och $x_{0,75}$ (den övre kvartilen) ofta av intresse, det vill säga de värden x för vilka P(X≤ x) är 25%, 50% respektive 75%. Några exempel på viktiga kontinuerliga fördelningar listas nedan (ibid):

- Normalfördelning
- Likformig fördelning (kan även vara diskret)
- Triangulär fördelning
- Gammafördelning
- Lognormal-fördelning
- Gumbelfördelning
- Exponentialfördelning

Av särskilt intresse för arbetets sannolikhetsbaserade dammhaveriberäkningar är den likformiga fördelningen, normalfördelningen och den triangulära fördelningen, vilka samtliga beskrivs närmare i senare avsnitt.

För att ange hur stort lägesmåttet är för en fördelning, det vill säga hur stor kapacitansen av datan $x_1, \ldots, x_n$ är i medeltal, används ofta det aritmetiska medelvärdet (Blom et al., 2005):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{1}^{n}(x_j - \tilde{x})^2} \tag{3}$$

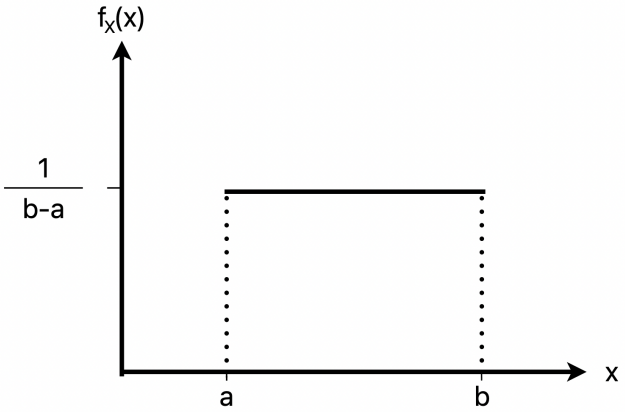
Ligger fördelningens datavärden nära varandra blir differensen i kvadraten liten och likaså standardavvikelsen; om spridningen tvärtom är större blir standardavvikelsen följaktligen större (ibid).

2.1.3 Likformig fördelning

Om den stokastiska variabeln X antar värden i ett utfallsrum av storlek n med lika stor sannolikhet 1/n sägs X ha en likformig fördelning (Blom et al., 2005). Detta innebär alltså att sannolikheten är konstant över utfallsrummet, och att X har täthetsfunktionen

$$f_X(x) \rightarrow \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{om} \quad a < x < b \\ 0 & \text{annars} \end{cases}$$

där a och b är den undre respektive övre gränsen för utfallsrummet (ibid). Täthetsfunktionen $f_X(x)$ som beskriver sannolikhetsfördelningen för en likformig fördelning visas därmed av figur 1 nedan.



Figur 1: Täthetsfunktion för en likformigt fördelad stokastisk variabel X mellan a och b.

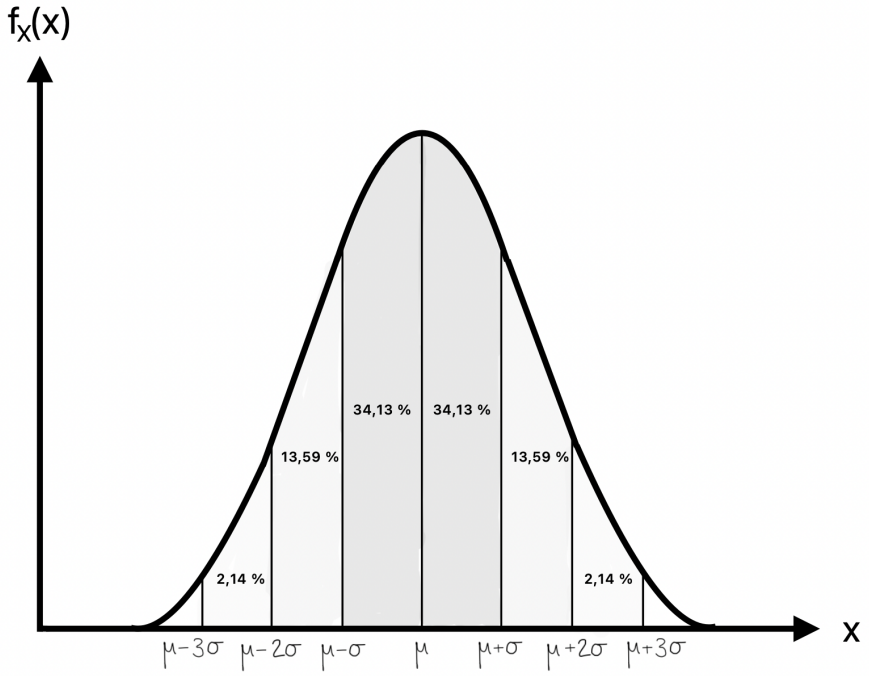
2.1.4 Normalfördelning

Om variationen av den stokastiska variabeln X kan beskrivas med täthetsfunktionen

$$f_X(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2}, \quad -\infty < x < \infty \tag{4}$$

där $\sigma > 0$ är standardavvikelsen för fördelningen och μ är det så kallade väntevärdet (detsamma som medelvärdet för ett stort antal slumpmässiga försök), sägs X ha en normalfördelning (Blom et al., 2005). Många mätbara företeelser i naturen och samhället visas kunna beskrivas enligt en ungefärlig normalfördelningskurva; detta är anledningen till att sannolikhetsfördelningen är så pass frekvent förekommande för att beskriva variationen av olika fenomen inom statistikteorin (Frisk, 2019). Fördelningen kännetecknas enligt figur 2 av att sannolikheten för att den stokastiska variabeln X antar värden nära medelvärdet är hög, medan sannolikheten

minskar gradvis desto längre avståndet från medelvärdet är. Vidare kännetecknas fördelningen av dess symmetri kring det centrala medelvärdet. På grund av detta uppvisar fördelningen den betydande egenskapen att en viss andel av alla observationer finns samlade inom ett visst antal standardavvikelser σ från medelvärdet μ. Till exempel finns 68.26% av alla värden inom intervallet $\mu \pm \sigma$ (ibid).



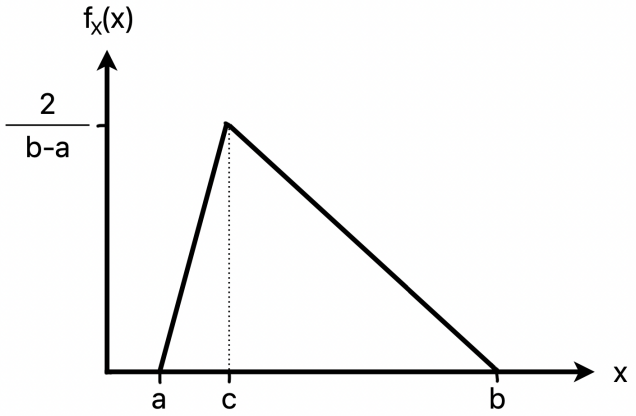
Figur 2: Täthetsfunktion för en normalfördelad stokastisk variabel X med medelvärde μ och standardavvikelse σ.

2.1.5 Triangulär fördelning

Om den stokastiska variabeln X antar värden inom intervallet a < x < b där a och b är den undre respektive övre gränsen för utfallsrummet, och där tätheten ökar linjärt från a till ett toppvärde c och därefter minskar linjärt från c till b, sägs X vara triangulärt fördelad. Täthetsfunktionen $f_X(x)$ ges således av:

$$f_X(x) \rightarrow \begin{cases} \frac{2(x-a)}{(b-a)(c-a)} & \text{om} \quad a \leq x < c \\ \frac{2(b-x)}{(b-a)(b-c)} & \text{om} \quad c \leq x \leq b, \end{cases}$$

och illustreras i figur 3 (Weisstein, 2025). Fördelningen kännetecknas av att sannolikheten för att den stokastiska variabeln X antar värden nära x=c är stor, där täthetsfunktionen når sitt maximum. Formen är symmetrisk om c är mittpunkten mellan a och b, men kan även vara sned beroende på placeringen av c. Den triangulära fördelningen används ofta som ett approximativt alternativ till normalfördelning när information om variabelns variation är begränsad, men ett troligt minimum, maximum och mest sannolika värde kan anges.



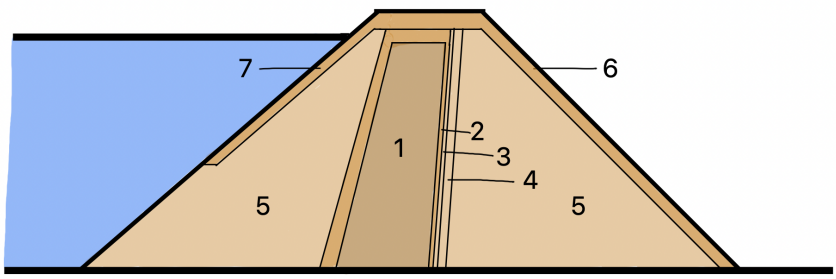
Figur 3: Täthetsfunktion för en triangulärt fördelad stokastisk variabel X mellan a och b och med vanligast förekommande värde c.

2.2 Fyllningsdammar

Fyllningsdammar är världens mest vanligast förekommande dammkonstruktion (Ashraf et al., 2018). Beroende på om stödfyllningen består av jord (naturlig sand eller grus) eller sten (sprängsten) kategoriseras fyllningsdammen som jord- eller stenfyllningsdamm (Svenska kraftnät, 2019). Vilken typ av material som dammen är uppbyggd av beror på hur materialtillgängligheten i närheten av anläggningsplatsen såg ut vid uppdämningen. Äldre och mindre fyllningsdammar i Sverige är ofta uppbyggda av endast ett material, så kallade homogena dammar. I de flesta fall utgörs detta av morän, men i andra delar av Sverige där morän inte är lika vanligt förekommande kan jordarter som lera uppträda. De flesta moderna fyllningsdammar är dock zonindelade, vilka beskrivs närmare i kommande avsnitt (ibid).

2.2.1 Zonindelad fyllningsdamm

För en typisk zonindelad jord- och stenfyllningsdamm kan generellt tvärsnittet illustreras enligt figur 4, bestående av olika zoner med olika funktioner. I dammens centrala del finns en tätkärna av morän eller lera med låg genomsläpplighet av vatten (1) (Svenska kraftnät, 2019). Utanför denna finns på bägge sidor skyddande zoner, så kallade filter, bestående av sand och grus som stabiliserar tätkärnan och förhindrar läckage och materialtransport (2,3,4). På varje sida om dessa finns stödfyllning (5) följt av erosions- och släntskydd som utgörs av stenmaterial (6,7) (ibid).



1	Tätkärna: morän eller lera
2,3,4	Filter: sand eller grus
5	Stödfyllning: grovt grus
6,7	Erosions-/släntskydd: sten

Figur 4: Schematisk illustration av ett exempel på en zonindelad fyllningsdamms tvärsnitt, baserad på Svenska kraftnät (2019).

2.2.2 Jordegenskaper och erosionsmekanismer

Beroende på fyllningsdammens uppbyggnad och dess materialegenskaper skiljer sig aktuella erosionsmekanismer och sedimenttransporter åt. Dessa mekanismer är avgörande för en potentiell bräschöppning i dammen och behöver av den anledningen definieras i dammhaveriberäkningar. Ett jordmaterials egenskaper beror på förhållanden mellan fast massa, porvatten och porgas, och uttrycks med hjälp av storheter som bland annat porositet, torrtunghet och friktionsvinkel (Larsson, 2008). Jordmaterialets kornstorlek är en av de viktigaste faktorerna som påverkar dess mekaniska egenskaper och brukar betecknas med storheten d. Kornstorleken för de partiklar som motsvarar 50 % av den totala viktmängden på kornfördelningskurvan betecknas som d_{50}. Denna parameter representerar medianvärdet av korndiametern vilket innebär att hälften av partiklarna i jordmaterialet har en större och hälften en mindre diameter än d_{50} (ibid). I en fyllningsdamm varierar således värdet på d_{50} beroende på zon. I tätkärnan av morän är partiklarna mycket mindre jämfört med partikelstorleken i dammens skyddande zoner av sand och grus, samt i stödfyllningen av sten, vilket redovisas i korngruppsskalan i tabell 1.

Tabell 1: Jordklassificering av kornstorlek, baserad på HR Wallingford (u.å.).

Jordklassificering		**Fraktion [mm]**
Block		> 200
Sten		$200 - 60$
Grus	Grov	$60 - 20$
	Mellan	$20 - 6$
	Fin	$6 - 2$
Sand	Grov	$2 - 0,6$
	Mellan	$0,6 - 0,2$
	Fin	$0,2 - 0,06$
Silt	Grov	$0,06 - 0,02$
	Mellan	$0,02 - 0,006$
	Fin	$0,006 - 0,002$
Lera		$< 0,002$

Ett jordmaterial med små kornstorlekar såsom lera och silt kallas kohesiv jord. Kohesion ökar hållfastheten i jorden och därmed kraften mot erosion (Andersson et al., 2008). Innehåller jordmaterialet ingen lera eller silt benämns denna istället som friktionsjord vilken har mindre hållfasthet och därmed en lägre motståndskraft mot erosion (ibid). Friktionsjord definieras av att hållfastheten utgörs av friktionskrafter mellan kornen, medan hållfastheten i kohesionsjord utgörs av både friktionskrafter mellan kornen och fysikaliska kohesionskrafter, det vill säga attraktionskrafter mellan molekylerna i jorden (Statens geotekniska institut, 2023).

För att sätta ett mått på jordens hållfasthet används dess så kallade friktionsvinkel (Larsson, 2008). Friktionsvinkeln beror på jordens mineral- och kornform och är generellt större för jordar bestående av oregelbundna korn med skarpa kanter jämfört med jordar av runda och jämna korn (ibid). För en torr hög av friktionsjord på plant underlag är friktionsvinkeln densamma som dess rasvinkel, det vill säga den största möjliga vinkeln på jordhögens lutning vid vilken partiklarna i högen inte övergår till att rulla (Statens geotekniska institut, 2023). Ett annat viktigt begrepp

för att beskriva ett material och bedöma dess erosionsrisk är skjuvspänning (Söderström et al., 2020). När skjuvspänningen som orsakas av strömningen överstiger värdet på materialets kritiska skjuvspänning, det vill säga den minimala skjuvspänning som är nödvändig för att erodera och sätta materialets partiklar i rörelse, kan sedimenttransport ske. Vidare beräkningar av skjuvspänningen för ett material ges i avsnitt 2.3.2.

En annan avgörande faktor för ett jordmaterials egenskaper är dess porositet. Porositeten beskriver förhållandet mellan porvolymen V_p och den totala volymen V enligt:

$$p = \frac{V_p}{V} \tag{5}$$

och varierar mellan 25–75 % för kohesiv jord och 15-45 % för friktionsjord (Larsson, 2008). Således innebär högre porositet ett mer luftigt material och mindre porositet ett mer tätt packat material. Vidare beskriver Larsson (2008) torrdensiteten [kg/m^3] för ett jordmaterial som förhållandet mellan kornens massa m_k och den totala volymen V enligt ekvation 6. Torrdensiteten kan också härledas från materialets kompaktdensitet ρ_s [kg/m^3] enligt ekvation 6, vilken av Larsson (2008) beskrivs som förhållandet mellan kornens massa m_k och dess volym V_S utan porvolym.

$$\rho_d = \frac{m_k}{V} = \rho_s(1-p). \tag{6}$$

Utifrån definitionen av tunghet γ [kN/m^3] som förhållandet mellan kornens tyngd och den totala volymen, ges därtill den nödvändiga dammhaveriparametern för materialets torrtunghet av

$$\gamma_d = \frac{m_k g}{V} = \rho_d g. \tag{7}$$

2.2.3 Dammhaveri i fyllningsdammar

Utvecklingen av en dammbräsch är en komplicerad process som skiljer sig åt beroende på dammens egenskaper och den underliggande orsaken till dammhaveriet (Macchione et al., 2023). Den vanligaste typen av dammhaveri av fyllningsdammar är de till följd av överströmning eller inre erosion (Ashraf et al., 2018; Říha et al., 2020; West et al., 2018). Överströmning innebär en översvämning av dammen av ett stadigt flöde, där vatten gradvis rinner över dammkrönet på grund av otillräcklig kapacitet eller funktionsfel i utskovet (West et al., 2018). Vid dammhaveri till följd av överströmning sker främst två typer av erosionsprocesser: yterosion och trappstegserosion (eng. head cut erosion), där yterosion karaktäriserar den första fasen i öppningen av en dammbräsch uppbyggd av friktionsjord medan trappstegserosion främst är aktuell för dammar av kohesiva jordar (Ashraf et al., 2018; Macchione et al., 2023; West et al., 2018). Om dammhaveriet inte orsakas av överströmning utan istället av inre erosion (eng. piping), initieras förloppet av att erosionen successivt skapar ett inre hål genom dammkroppen. En fortsatt inre erosion leder till att hålet växer tills dammkroppen ovanför kollapsar, resulterande i en öppen bräsch (ibid).

2.3 Beräkningsteori

För att beräkna vattennivåer och flödeshastigheter i ett vattendrag med känd geometri och tillgängliga flödesdata, antingen observerade eller modellerade, kan olika analytiska och numeriska hydrauliska beräkningsmetoder tillämpas (Söderström et al., 2020). Samtliga metoder bygger på ett antal centrala hydrauliska parametrar vilka inledningsvis beskrivs mer ingående i avsnitt 2.3.1. Därefter redogörs för de hydrauliska beräkningar som ligger till grund för flödesmodellering i avsnitt 2.3.2 och 2.3.3. Avslutningsvis presenteras de beräkningsmodeller som vanligen används vid dammhaveriberäkningar i avsnitt 2.3.4.

2.3.1 Hydrauliska parametrar

Froudes tal

Froudes tal är ett dimensionslöst tal som beskriver relationen mellan vattennivå och vattenhastighet:

$$F = \frac{V}{\sqrt{gL}} \tag{8}$$

där V=Q/A är vattendragets medelhastighet och L den karaktäristiska längden som kan ansättas till dess hydrauliska medeldjup y_m=A/T, det vill säga vattnets tvärsnittsarea vinkelrät mot flödesriktningen delat med bredden av vattenytan (Cederwall & Larsen, 1979). Nämnaren blir då $\sqrt{gy_m}$, och motsvarar den maximala hastigheten för gravitationsvågor (ibid). Froudes tal kan därför också beskrivas representera gravitationens effekt på vattenflödet, där strömningstillståndet kategoriseras utifrån förhållandet mellan interna krafter och gravitationskrafter (Chow, 1959). Ett djupt och långsamtflytande vattendrag definieras av ett lågt Froudes tal (F<1) där gravitationskrafterna är mer framträdande, flödet kallas då strömmande (Söderström et al., 2020; Chow, 1959). Ett grundare vattendrag med högre vattenhastighet definieras av ett högt Froudes tal (F>1) där de interna krafterna är mer framträdande, och i detta fall beskrivs flödet som stråkande (ibid). Om Froudes tal precis är lika med 1 är vattendragets medelhastighet lika med den maximala hastigheten för gravitationsvågor (V=$\sqrt{gy_m}$) och flödet sägs vara i ett kritiskt tillstånd (Chow, 1959). Övergången där det kritiska tillståndet inträffar sker i en så kallad bestämmande sektion i vattendraget, till exempel vid ett dammkrön (Cederwall & Larsen, 1979).

Reynolds tal

Reynolds tal är ytterligare ett dimensionslöst tal för att kategorisera strömningstillståndet i ett vattendrag och beskriver förhållandet mellan effekterna av vattnets viskositet relativt dess tröghet:

$$R = \frac{VL}{\upsilon} \tag{9}$$

där V är vattendragets medelhastighet [m/s], L den karaktäristiska längden som ansätts till dess hydrauliska radie R_n vid kanalströmning [m], och υ vattnets kinematiska viskositet [m^2/s](Chow, 1959). Om de viskösa krafterna är dominanta över de interna tröghetskrafterna kallas flödet laminärt, och motsvarar mindre värden på R, R $<$ 500. Om de viskösa krafterna tvärtom är svaga i jämförelse med de interna tröghetskrafterna kallas flödet turbulent, och motsvarar stora värden på R, R $>$ 12500. Mellan det laminära och turbulenta flödet finns en fas kallad övergångsströmning (ibid). I praktiken vad gäller sjöar och vattendrag är endast turbulent strömning och ett högt värde av R av relevans (Söderström et al., 2020), och därav även för detta arbete.

Mannings tal

Mannings tal M ($m^{1/3}$/s) beskriver den sammanvägda ytråheten för bottnen i ett vattendrag med hänsyn till ytans skrovlighet och strömningsförluster vid trånga sektioner (Söderström et al., 2020). Ett lägre Mannings tal definierar en skrovlig yta medan ett högre tal definierar en slätare yta (ibid). Utanför Sverige och Norden används ofta Mannings n istället för Mannings tal, där n = 1/M.

2.3.2 Hydrauliska beräkningar

2.3.2.1 Analytiska beräkningsmetoder

Analytiska hydrauliska beräkningar av vattenflöde, -hastighet och – nivå lämpar sig bäst för stationära flöden och enklare geometrier, och grundas i Mannings ekvation för att beskriva vattnets flöde och hastighet:

$$V = MR^{2/3}\sqrt{sin\theta} \tag{10}$$

eller

$$Q = MR^{2/3}A\sqrt{sin\theta} \tag{11}$$

där M är Mannings tal ($m^{1/3}/s$), R är den hydrauliska radien för normalvattendjup, A är tvärsnittsarean för en sektion av normalvattendjup och θ är vattendragets bottenlutning (nivåskillnad/sträcklängd) (m/m) (Söderström et al., 2020; Andersson et al., 2008). Mannings ekvation används vid hydrauliskt rå strömning, det vill säga då flödet är turbulent och Reynolds tal högt, samt den relativa råheten är stor. Detta innebär att friktionskoefficienten endast kan beskrivas bero på den relativa råheten och att friktionsförlusterna därmed är oberoende Reynolds tal (ibid).

Vid fri avbördning av flöde över ett krön används istället överfallsekvationen (eng. weir flow equation) för att beskriva flödet:

$$Q = CBH^{1.5} = \frac{2}{3}\mu B\sqrt{2gH^3} \tag{12}$$

där $C = \frac{2}{3}\mu\sqrt{2g}$ är överfallskoefficienten (-), B utskovets eller krönets bredd (m), μ en flödeskoefficient (-) och H överfallshöjden (m) (Chow, 1988; Söderström et al., 2020). Denna ekvation kan användas för att beräkna avbördning genom utskov samt genom bräschen.

2.3.2.2 Numeriska beräkningsmetoder

Numeriska hydrauliska beräkningar lämpar sig bättre än analytiska för vattendrag med dynamiska flöden och komplexa geometrier (Söderström et al., 2020). De numeriska modellerna kan kategoriseras i endimensionella (1D), tvådimensionella (2D) och ibland även tredimensionella (3D) modeller vilka skapar olika grader av förenkling av verklighetens komplexa natur (Söderström et al., 2020). Sammanfattat kan modellerna beskrivas enligt nedan:

- 1D: Vattendraget modelleras med en linje där vattennivån och -hastigheten antas vara konstant i en tvärsnittssektion. Detta kräver att användaren i förväg definierar vattendraget och ett antal tvärsnitt längs denna, där vattnet flödar vinkelrätt mot tvärsnitten.
- 2D: Vattendraget modelleras över ett plan där vattennivån och -hastigheten antas vara konstant i en av flera skapade beräkningsceller som området delats in i. Detta kräver endast att användaren anger in- och utflödeshastigheter på modellranden, sedan styrs flödet mellan cellerna av nivåskillnader i modellen.
- 3D: Vattendraget modelleras över en volym där planet multiplicerats flera gånger vertikalt för att skapa ett tredimensionellt system där vertikala rörelser kan modelleras (ibid).

1D-modeller är fördelaktigt snabba och enkla beräkningsmässigt, däremot är noggrannheten av att förutsäga flödet genom bräschen generellt lägre än för 2D-modeller (Morris & Hassan, 2005).

Den teoretiska grunden för hydrauliska 1D-beräkningar beskrivs i *Open Channel Hydraulics* (Chow, 1959) - enligt energibevarandeprincipen måste den totala energin vid en punkt 1 vara

lika med energin vid en annan punkt 2 inklusive energiförlusterna h_f mellan de två punkterna, det vill säga:

$$z_1 + y_1 cos\theta + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + y_2 cos\theta + \frac{V_2^2}{2g} + h_f \tag{13}$$

där z är höjden relativt referensplanet, y djupet under vattenytan, θ vinkeln för bottenkanalen och $\frac{V^2}{2g}$ hastighetshöjden, det vill säga det dynamiska trycket, i höjdform (ibid). Energiekvationen kan tillämpas för varje godtyckligt tvärsnitt i en 1D-modell, där energiförlusterna omfattas av både friktionsförluster, vilka beräknas utifrån Mannings ekvation 10, och lokala förluster.

2.3.2.3 Magasinsberäkningar

Den mest förenklade formen av magasinsberäkningar utgörs av nolldimensionella (0D) modeller, även kallade boxmodeller. Dessa modeller kan inte betraktas som hydrodynamiska eftersom de behandlar systemet som en enhetlig volym utan intern geometri. Magasinet representeras istället av en 'box' med definierade in- och utflöden, där vattenbalansen beräknas genom att kontinuerligt jämföra dess enligt

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - Q(t), \tag{14}$$

där S(t) är mängden lagrad vatten, I(t) är inflödet och Q(t) utflödet (Chow et al., 1988). Denna ekvation benämns kontinuitetsekvationen och beskriver lagringen av vatten i ett hydrologiskt system över tid. Boxmodellens parametrar inkluderar faktorer som påverkar inflöde och utflöde, såsom dammegenskaper, lagringskapacitet och väderdata. För att kunna beräkna utflödeshydrografen Q(t) krävs ytterligare en relation mellan S, I och Q, eftersom både S och Q är okända (givet att I är känt). Denna relation kan skrivas som en funktion av magasinvolymen utifrån I och Q samt dess tidsderivator (ibid):

$$S = f\Big(I(t), \frac{dI}{dt}, \frac{d^2I}{dt^2}, ..., Q(t), \frac{dQ}{dt}, \frac{d^2Q}{dt^2}\Big) \tag{15}$$

2.3.3 Sedimenttransportberäkningar

Vid erosionsbaserade dammhaveriberäkningar beräknas centrala dammhaveriparametrar genom olika erosionsmodeller, vilket gör det nödvändigt att redogöra för de bakomliggande erosionsmekanismerna. Erosion av jordmaterial kan ske genom olika mekanismer vilket ger upphov till olika typer av sedimenttransporter. I ett vattendrag sker erosion av både botten och sidolutningar, och beroende på vattnets hastighet (Froudes tal) och förmåga att bära med sig sedimentet transporteras det eroderade materialet olika långt (Andersson et al., 2008).

2.3.3.1 Bottenskjuvspänning

Bottenskjuvspänning beskriver de totala skjuvkrafter som verkar per ytenhet, vilken för bottnen i ett vattendrag kan uttryckas som summan av de friktionskrafter som orsakas av bottenmaterialet τ' (N/m^2) (eng. skin fraction) och de friktionskrafter som orsakas av bottenformer τ" (N/m^2) (eng. bed forms) enligt:

$$\tau = \tau' + \tau'' \tag{16}$$

En annan vanligt förekommande formel för den totala bottenskjuvspänningen är:

$$\tau = \rho g R S \tag{17}$$

där ρ är vattnets densitet (kg/m^3), g är tyngdaccelerationen (m/s^2), R är den hydrauliska radien (m) och S är vattenytans lutning (m/m). Om bottenskjuvspänningen istället uttrycks

med Mannings tal M ($m^{1/3}/s$) (se definition i avsnitt 2.3.1) och vattenhastigheten V (m/s) blir formeln som följande:

$$\tau = \frac{\rho g V^2}{M^2 R^{1/3}} \tag{18}$$

En rimlig förenkling i detta arbete vad gäller sedimenttransportberäkningar och erosion för en lokal yta är att den totala bottenskjuvspänningen i huvudsak utgörs av de friktionskrafter som orsakas av materialet, det vill säga $\tau = \tau$' (ibid).

Ett dimensionslöst tal som beskriver när erosion äger rum och därmed sambandet mellan bottenskjuvspänningen och den kritiska bottenskjuvspänningen τ_c är Shields tal τ_*:

$$\tau_* = \frac{\tau_c}{\rho_w (s-1) g d} \tag{19}$$

där ρ_w är vattnets densitet (g/m^3), s=ρ_s/ρ_w där ρ_s är jorddensiteten (2650 kg/m^3), g är tyngdaccelerationen (m/s^2) och d partikelstorleken (Andersson et al., 2008).

2.3.3.2 Sedimenttransportberäkningar

För friktionsjord finns olika formler framtagna för bottentransport, där bland den mest använda formeln är Meyer-Peter-Müller (Fread, 1988) vilken visas bland andra i tabell 2.

Tabell 2: Sedimenttransportekvationer för friktions- och kehesionsjordar.

Friktionsjord	**Kohesionsjord**
Meyer-Peter-Müller (Fread, 1988)	Meyer-Peter-Müller (Fread, 1988)
Yang (1979)	Hanson (2004)
Visser (1998)	Chen (1986)
Chen (1986)	

För kohesionsjordar är sedimenttransport svårare att beräkna, och de modeller som används bygger i regel på empiriska data (ibid). Sammantaget uttrycks dessa med någon variant av den som utvecklades av Chen (1986) för mängden eroderat material per yt- och tidsenhet ($kg/(m^2 s)$):

$$E = K(\tau - \tau_c(z))^n \tag{20}$$

där K är en empirisk konstant som beror på jordens egenskaper (s/m), τ är skjuvspänningen längs botten (N/m^2), τ_c är den kritiska bottenskjuvspänningen (N/m^2), z är erosionsdjupet (m) och n är en annan empirisk konstant (-). Förutom Chen (1986) finns även förekommande formuleringar såsom Hanson (2004) och Meyer-Peter-Müller (Fread, 1988) för kohesionsjord.

2.3.4 Beräkningsmodeller för förutsägning av bräschutveckling vid dammhaveri

De främsta metoderna för att bestämma relevanta dammhaveriparametrar och förutsäga ett potentiellt bräschförlopp, som kan vara såväl analytiska som numeriska, delas vanligtvis in i tre huvudtyper (West et al., 2018, Wahl et al., 1998). I detta arbete benämns dessa beräkningsmetoder som: empiriska ekvationer, parametriska beräkningsmodeller samt fysiskt baserade beräkningsmodeller, vilka beskrivs närmare i följande avsnitt.

2.3.4.1 Empiriska ekvationer

Den mest grundläggande metoden för att förutsäga bräschutvecklingen vid ett dammhaveri baseras på empiriskt härledda ekvationer. Utifrån dessa samband kan olika centrala dammhaveriparametrar, såsom bräschbredd och utvecklingstid, beräknas. Sambanden är framtagna genom

regressionsanalys av observerad data från historiska dammhaverier (West et al., 2018; Wahl et al., 1998; Sammen et al, 2017). Ett flertal empiriska ekvationer för att uppskatta bräschparametrar har historiskt tagits fram och kännetecknas av att de är relativt enkla och lättillgängliga då de kräver tillgång till ytterst lite information om dammen. Vanligt förekommande ekvationer för bräschbredd och utvecklingstid har formulerats av Froehlich (1995), Froehlich (2008), MacDonald & Langridge-Monopolis (1984) och Von Thun & Gillette (1990) se Teal & Wahlin, 2024; Wahl et al., 1998; Ahmadisharaf et al., 2016); West et al., (2018), och sammanställs i tabell 3. Utifrån de empiriska ekvationerna kan maxflödet beräknas och en utflödeshydrograf uppskattas (Wahl et al., 1998). Sambanden är dock förknippade med stora osäkerheter till följd av osäkerheter i den historiska data de baseras på, men de är snabba och kan anses vara lämpliga för lågriskbedömningar (West et al., 2018). De empiriska ekvationerna används därför som ett komplement i valideringsprocessen av arbetets dammhaveriberäkningar.

Tabell 3: Uppskattning av centrala dammhaveriparametrar enligt historiskt formulerade empiriska ekvationer.

Underlag	**Empirisk ekvation**
Froehlich (1995)	$\bar{B} = 0,1803 K_0 V_w^{0,32} h_b^{0,19}$ $t_f = 0,00254 V_w^{0,53} h_w^{-0,9}$
Froehlich (2008)	$\bar{B} = 0,27 K_0 V_w^{0,32} h_b^{0,04}$ $t_f = 0,0176 \sqrt{\frac{V_w}{g h_b^2}}$
MacDonald & Langridge-Monopolis (1984)	$\bar{B} = \frac{V_{er} - h_b^2 (Cz + \frac{h_b z z_3}{3})}{h_b (C + \frac{z z_3}{2})} + z h_b$ $t_f = 0,0179 V_{er}^{0,364}$ $V_{er} = 0,0261 (V_w h_w)^{0,769}$ (jordfyllningsdamm) $V_{er} = 0,00348 (V_w h_w)^{0,852}$ (icke jordfyllningsdamm)
Von Thun & Gillette (1990)	$\bar{B} = 2,5 h_w + C_b$ $t_f = 0,015 h_w$ (lätt eroderbar) $t_f = 0,02 h_w + 0,25$ (svårt eroderbar)

$\bar{B}$: medelbräschbredd [m], K_0: korrigeringsfaktor för överströmning (1.4 vid överströmning och 0.9 annars), V_w: volym vatten som passerar bräschen [m^3], h_b: bräschdjup från dammkrön till bräschbotten [m], t_f: bräschens utvecklingstid [h], V_{er}: volym eroderat dammaterial [m^3], C: dammkrönsbredd [m], z: bräschens sidolutning (H:1V), z_3: summan av dammens upp- och nedströmslutningar ($z_1 + z_2$), h_w: hydrauliskt djup över bräschbotten vid haveri [m], C_b: koefficient enligt Von Thun & Gillette (1990), funktion av reservoarvolym [m].

2.3.4.2 Parametriska beräkningsmodeller

Parametriska beräkningsmodeller genomför dammhaveriberäkningar som ett tidsberoende dammhaveriförlopp, där bräschutvecklingen definieras i förväg av användaren genom angivelse av olika centrala parametrar, såsom bräschens slutliga bottenbredd och dess utvecklingstid (West et al., 2018; Wahl et al., 1998). Utifrån angivna dammhaveriparametrar beräknas vattenflödet genom bräschöppningen med hjälp av analytiska hydrauliska beräkningar. Parametrarna kan uppskattas med tidigare nämnda empiriska ekvationer för att förutsäga bräschutvecklingen av ett dammhaveri, eller genom jämförelse med en eller flera liknande historiska dammhaverier (ibid.). Dessa modeller medför därmed inte någon ökad noggrannhet i förutsägelsen av bräschförloppet jämfört med de empiriska ekvationerna, utan de har precis som dessa ekvationer stora

osäkerheter till följd av de parametervärlden som väljs för bräschutvecklingen och den historiska data de baseras på (West et al., 2018). De passar därför bäst för lågriskbedömningar. Parametriska modeller förbättrar dock resultaten i form av direkt genererade utflödeshydrografer snarare än att beräkna maxflödet och därefter uppskatta utflödeshydrografen, vilket kan vara av betydelse för fortsatt modellering och analys (ibid).

2.3.4.3 Fysiskt baserade beräkningsmodeller

Fysiskt baserade beräkningsmodeller genomför dammhaveriberäkningar av ett dammhaveri som ett erosionsbaserat dammhaveriförlopp, där dammhaveriparametrarna utifrån erosionsmodeller beräknas fram (West et al., 2018; Wahl et al., 1998). Dessa modeller baseras på hydrauliska principer, jordmekanik och sedimenttransport (Wahl et al., 1998), och beskriver haveriets utveckling som en funktion av olika parametrar hos vattenflödet, till exempel som skjuvspänning och flödeshastighet (Macchione et al., 2023). Osäkerheten för fysiska modeller är lägre till följd av mer komplexa underliggande matematiska beräkningar, men de är precis som de andra modellerna beroende av tillförlitliga data (West et al., 2018; Wahl et al., 1998). De enklaste fysiska modellerna kan beräknas både analytiskt och numeriskt, mer komplexa modeller beräknas däremot endast numeriskt (Wu et al, 2011 se West et al., 2018).

3 Metod

Inför genomförandet av sannolikhetsbaserade dammhaveriberäkningar var det avgörande att bestämma lämpliga beräkningsprogram samt val av relevanta historiska dammhaverier som fallstudier. Tre olika programvaror valdes ut tillsammans med två historiska dammhaverier. För att inleda beräkningarna för respektive fall uppskattades inledningsvis dammhaveriparametrar såsom bräschdimensioner och utvecklingstid baserat på dokumentation över de valda fallstudierna, samt jämförelse med empiriska samband. Beräkningsmetodiken genomfördes sedan för varje fallstudie och program i två faser: inledande deterministiska beräkningar och därefter stokastiska beräkningar.

3.1 Val av beräkningsprogram

Flera forskare har tidigare antagit utmaningen att modellera dammhaverier och en mängd studier och modelleringar har historiskt genomförts för att förstå och förutsäga dessa (Říha et al., 2020). Bland de många programvaror som nämns i litteraturen finns exempelvis HEC-RAS, Mike av DHI, Embrea, WinDAM och Breacher. Med hänsyn till att boxmodeller ansågs vara mest lämpade för examensarbetets syfte och att modellen behövde möjliggöra stokastiska beräkningar, identifierades beräkningsprogrammen Breacher och Embrea som mest lämpliga för examensarbetets analys. Dessa boxmodeller baseras huvudsakligen på magasinsberäkningar enligt 2.3.2.3 där utflödet Q(t) genereras av bräschförloppet som bestäms av olika bräschutvecklingsmodeller. För att etablera en jämförelsegrund i fallstudie 1 valdes även att skapa en modell i Mike+ av DHI utöver Breacher och Embrea.

3.1.1 Breacher

Breacher är ett dammhaveriverktyg skapad av Kyle Thomson och Mitchell Redenbach, grundare av det australienska specialistföretaget Forward Hydro inom vatteningenjörsteknik, för att modellera översvämningar vid dammhaveri (Thomson & Redenbach, 2024). Dammhaveriverktyget genomför parametriska dammhaveriberäkningar av bräschutvecklingen, utflödeshydrografen och maximala flödet i en textfilbaserad boxmodell (Forward Hydro, 2024). Dammhaveriparametrar, såsom bräschens slutliga maximala bredd och den tid det tar för bräschen att utvecklas, måste därmed definieras i förväg av användaren. Utöver dessa parametrar krävs även att magasinets inflödeskurva, volymkurva och avbördningskurva specificeras.

Breacher skapades med syftet att motsvara det en- eller tvådimensionella simuleringsverktyget HEC-RAS. Detta beskrivs enligt skaparna som eftersträvansvärt i och med att HEC-RAS idag är branschstandard och den mest välanvända programvaran för dammhaverimodellering. Till skillnad från HEC-RAS möjliggör Breacher och dess enklare modelluppbyggnad däremot snabbare simuleringar, vilket i sin tur möjliggör genomförandet av tusentals simuleringar på en kort tid. Breacher tillåter således en stokastisk bedömning av dammhaveri. Genom angivelse av antalet simuleringar som ska utföras och mellan vilka gränsvärden parametrarna slumpmässigt ska väljas inom enligt likformiga sannolikhetsfördelningar, beräknar programvaran flera olika utfall av dammhaverier (ibid.).

Förutom att genomföra dammhaveriberäkningarna jämför Breacher dessa mot litteraturvärden (Froehlich, Hooshyaripor, Xu & Zhang, Azmi & Thomson se Forward Hydro, 2024) och historiska data (Azmi & Thomson, 2024 se Forward Hydro, 2024). Syftet med detta är att jämföra värdena, främst avseende bräschnivån och magasinvolymen, samt resultatet från kommandofilen mot verkliga, historiska data för att hitta den närmsta motsvarigheten av dammhaveri (Forward Hydro, 2024).

3.1.2 Embrea

Embrea är ett ytterligare dammhaveriverktyg för att modellera och förutsäga bräschutvecklingen i fyllningsdammar. Det är utvecklat under de senaste 20 åren från det som ursprungligen hette HR Breach av forskare vid HR Wallingford i Storbritannien, en forsknings- och utvecklingsorganisation inom bland annat hydraulisk modellering (HR Wallingford, u.å.; Morris et al., 2020). Embrea är till skillnad från Breacher en fysiskt baserad numerisk modell där bräschutvecklingen bestäms utifrån erosionsmodeller som baseras på hydrauliska principer och sedimenttransport. Programvaran utgår därför inte från en fördefinierad geometri eller tid för bräschutvecklingen, utan beräkningarna sker istället stegvis sektion för sektion genom modellen (ibid). Utflödet genom bräschen beräknas i varje tidpunkt enligt principen av de nolldimensionella magasinsberäkningarna beskriven i 2.3.2.3. Följaktligen kräver programvaran information om många fler parametrar vilka definieras i modellen, såsom olika materialegenskaper och erosionsparametrar. Dessutom resulterar beräkningarna i en långsammare simuleringstid än parametriska modeller (Morris et al., 2020).

Utöver nämnda parametervärden krävs även detaljerad information om de flöden som påverkar haveriförloppet. Magasinets tillrinning beskrivs med hjälp av en inflödeshydrograf, medan en volymkurva används för att ange sambandet mellan magasinets vattennivå och dess lagringsvolym. För att beskriva relationen mellan vattennivån i magasinet och utflödet genom dammens avbördningsstrukturer används en avbördningskurva (eng. *rating curve*). Slutligen krävs en utflödeshydrograf för att definiera dammens randvillkor nedströms.

I Embrea är det precis som i Breacher möjligt att genomföra stokastiska dammhaveriberäkningar. Detta genomförs i form av Monte Carlo-simuleringar vilka skapar sannolikhetsfördelade resultat utifrån definierade parameterintervall (HR Wallingford, u.å.). Till skillnad från Breacher däremot kan dessa väljas, utöver den likformiga fördelningen, enligt en normalfördelning eller en triangulär fördelning.

3.1.3 Mike+

Mike+ är en programvara utvecklad av det danska konsult- och forskningsinstitutet DHI och används för att modellera och analysera hydrologiska och hydrodynamiska system, inklusive översvämningsscenarier orsakade av dammhaveri (DHI, 2025b). I Mike+ är det möjligt att sätta upp både endimensionella- och tvådimensionella hydrauliska modeller, och programmet tillåter både parametriska och fysikaliskt baserade beräkningsmetoder. I detta arbete sätts en fysikaliskt baserad 1D-modell upp, se avsnitt 3.3.1.3 för vidare beskrivning.

Vid modellering av ett dammhaveri i Mike+ definieras parametrar för bräschens dimensioner och utveckling, där dammhaveriet kan initieras antingen som en funktion av tid eller när vattennivån uppströms dammen når en specifik fördefinierad nivå. I detta arbete initieras dammhaveriet enligt det senare alternativet. När en endimensionell beräkningsmodell tillämpas definieras tvärsektioner med regelbundna intervall längs vattendraget, med tätare placering vid platser där kanalgeometrin förändras markant såsom vid in- och utlopp eller nivåskillnader. Tvärsektionerna beskriver kanalens profil och geometri vilket är avgörande för beräkningar av vattenytans nivå och flödesdynamiken i varje sektion. Tillrinningen till magasinet beskrivs genom en inflödeshydrograf, och en avbördningskurva definieras för att beskriva sambandet mellan vattennivån i magasinet och utflödet genom dammens avbördningsstrukturer.

Mike+ stödjer däremot inte stokastiska beräkningar; varje parametervärde måste anges explicit och kan inte varieras slumpmässigt inom olika sannolikhetsintervall (ibid).

3.1.4 Nödvändiga dammhaveriparametrar för valda beräkningsprogram

Ett dammhaveris utvecklingsförlopp beskrivs genom flera centrala parametrar som tillsammans definierar dammens och bräschens fysiska egenskaper. För att möjliggöra modellering krävdes dessa således initialt uppskattas, med syftet att kunna representera dammens geometri och bräschens utveckling över tid. Nedanstående tabell redovisar de parametrar som definierades för att genomföra dammhaveriberäkningar i programvarorna Breacher, Embrea och Mike+.

Tabell 4: Nödvändiga dammhaveriparametrar i respektive beräkningsprogram.

	Breacher	**Embrea**	**Mike+**
Typ av bräschutvecklingsmodell	Parametrisk	Fysiskt baserad	Fysiskt baserad
Dammhaveriparametrar			
Bräschens maximala bottenbredd	x	x	x
Dammkrönsnivå	x	x	x
Bräschens bottennivå	x	x	x
Bräschens sidolutning	x		x
Initial magasinnivå	x	x	x
Vattennivå vid dammhaveri	x	x	x
Dammkrönsbredd	x	x	x
Dammkrönslängd		x	x
Lutning uppströms/nedströms	x	x	x
Bräschens utvecklingstid	x		
Dammstruktur		x	
Orsak till haveri*	x	x	x
Bräschens utvecklingskurva	x		
Sedimenttransportekvation		x	(x)**
Materialegenskaper		x	x

* Överströmning/inre erosion, ** Förutbestämd, en unik ekvation

I både Embrea och Mike+ som möjliggör fysikaliskt baserade beräkningar krävdes att parametervärden definierades i form av dammmaterialets egenskaper. I Embrea behövde dessutom vilken typ av sedimenttransportmodell som skulle användas specificeras för beräkningarna, till skillnad från i Mike+ där denna var fördefinierad till beräkningar framtagna av Engelund–Hansen (1967) (DHI, 2025a). Valet av modell i Embrea styrde vilka materialegenskaper som beaktades i beräkningarna, då olika modeller var känsliga för olika parametrar. Samtliga ekvationer är dock framtagna för material med korndiametrar upp till och med sandstorlek (det vill säga $\leq$ 2 mm) och är inte validerade för grövre material. Detta är en viktig begränsning att beakta vid dammhaveriberäkningar där materialet ofta består av grövre fraktioner än vad modellerna ursprungligen utvecklats för. En översikt över vilka parametrar som användes i respektive sedimenttransportekvation ges vidare i tabell 5.

Tabell 5: Översikt över vilka parametrar som används i respektive erosionsmodell i Embrea.

Ekvation	**Parametrar**									
	d_{50}	Friktionsvinkel	Porositet	Plasticitetsindex	Erosionskoefficient	Torrtunghet	Mannings n	Kritisk skjuvspänning	d_{30}	d_{90}
Original/mod. Hanson					x			x		
Yang	x					x				
Visser	x	x	x			x	x			
Chen (non cohesive)								x		
Chen (cohesive)				x				x		
MPM (non cohesive)	x						x	x	x	x
MPM (cohesive)				x			x	x	x	x

3.2 Val av historiska dammhaveridata för beräkningar

Två fallstudier av historiska observerade dammhaverier valdes för examensarbetets beräkningar för att möjliggöra validering av resultatet mot tidigare rapporterade fynd. Den första valda dammen var Tousdammen i Spanien som havererade år 1982. Dammen hade tidigare använts som fallstudie inom det europeiska forskningsprojektet ”IMPACT” från 2000-talet (Morris & Hassan, 2005) och hade väldokumenterade data erhållen från Alcrudo & Mulet (2007) som var tillgänglig för tillämpning. Den andra valda dammen var ett fullskaligt fälttest utfört i Norge, också inom ramen för det europeiska forskningsprojektet IMPACT (Morris & Hassan, 2005). Dammen konstruerades och havererades under hösten 2002 som en del av projektets syfte att förbättra förståelsen för dammhaverieförlopp.

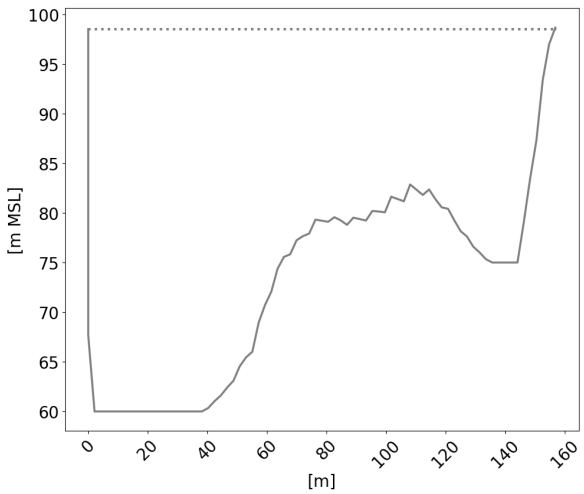
3.2.1 Fallstudie 1: Tousdammen

Tousdammen i sydöstra Spanien, Valencia havererade den 20 oktober 1982 (Alcrudo & Mulet, 2007). Dammen var en zonindelad stenfyllningsdamm med en tätkärna av lera, belägen vid Júcarflodens avrinningsområde omfattande 21600 km^2. En kraftig storm resulterade i en nederbördsmängd motsvarande det genomsnittliga årsmedelvärdet inom ett dygn, medförande omfattande översvämningar av flodens avrinningsområde. Dammhaveriet initerades när vattennivån i magasinet översteg dammkrönets nivå, 98,5 meter över havet, vilket orsakade överströmning och efterföljande dammhaveri med en betydande översvämning nedströms.

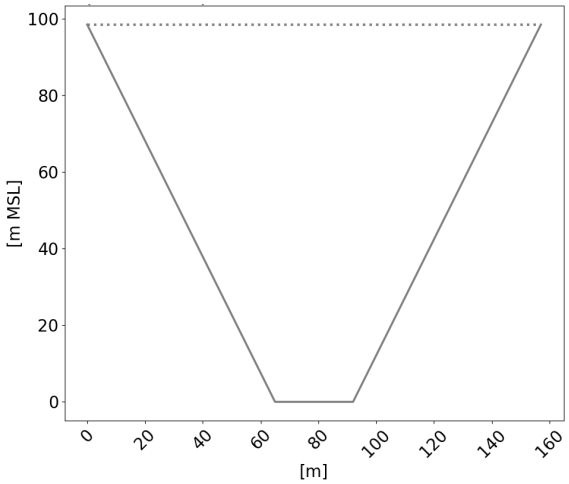
Figur 5: Flygbild av Tousdammen efter dammhaveri (Alcrudo & Mulet, 2007), återgiven med tillåtelse.

3.2.1.1 Uppskattning av Tousdammens dammhaveriparametrar

Dammhaveriet för Tousdammen var väldokumenterat, med registrerade data tillgängliggjorda genom en fallstudie av Alcrudo & Mulet (2007). Den information som presenterades i rapporten samt medföljande data på DVD-ROM baserades på officiella källor från de spanska myndigheterna CEDEX och Confederación Hidrográfica del Júcar, flygbilder av området efter haveriet samt fältobservationer och egna mätningar genomförda av författarna. DVD-ROM:en innehöll bland annat csv-filer med återskapat inflöde, utflöde samt magasinvolym för Tousdammen under händelseförloppet, vilket nyttjades direkt i beräkningarna. Utöver detta inkluderade datasetet topografisk information över dammområdet efter dammhaveriet, tillgänglig i form av en digital terrängmodell (DTM). Genom att bearbeta dessa data i ett geografiskt informationssystem (GIS) kunde tvärsnittsdata för den slutliga bräschprofilen extraheras, vilket möjliggjorde en grafisk framställning i Python. Det slutliga tvärsnittet för Tousdammens bräschprofil observerades följa kurvan i figur 6a.



(a) Tousdammens slutliga tvärsnittskurva av bräschöppningen.



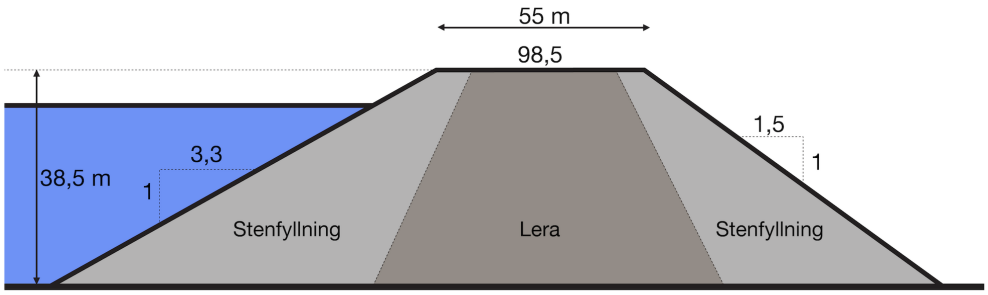
(b) Tousdammens ekvivalenta tvärsnittskurva av en trapetsformad bräschöppning.

Figur 6: Jämförelse av Tousdammens slutliga bräschöppning och dess ekvivalenta trapetsformade tvärsnittskurva. Figurerna visar höjd över havet [eng. MSL] som funktion av bräschens bredd [m], och illustrerar hur det observerade tvärsnittet kan förenklas i beräkningar.

Enligt branschstandard förenklas bräschöppningen för dammhaveriberäkningar av fyllningsdammar ofta som trapetsformad (Wahl et al., 1998; Sammen et al., 2017). För att den antagna trapetsformade bräschen i beräkningarna skulle motsvara en lika stor tvärsnittsarea som den observerade öppningen efter haveriet av Tousdammen (se figur 6a för illustration), ansattes den slutliga bräschens bottenbredd till beräknade 27 meter istället för den verkliga bottenbredden som uppgick till 40 meter (jämför figur 6b och 6a). Denna förenkling medförde att den trapetsformade bräschens sidolutningar kunde beräknas till 1,6 med vetskap av att den slutliga uppnådda bräschnivån var 38,5 meter. Utifrån de empiriska ekvationerna (tabell 3) beräknas värden av bräschens medelbredd mellan 152 och 263 m vilket presenteras i tabell 7. Dessa värden noteras vara mycket större än den observerade bräschbredden. Flygbilden i figur 5 visar att bräschöppningen begränsades av betongkonstruktioner på respektive sida, om inte detta hade varit fallet och fyllningsdammen hade varit längre än 150 m hade således potential för att erodera bräschen ännu större funnits.

I samtliga beräkningar ansattes vidare bräschens lägsta möjliga bottennivå enligt det observerade värdet på 60 meter i figur 6a. Detta antagande begränsade därmed bräschutvecklingen genom att specificera den lägsta nivå som dammens fyllnadsmaterial kunde eroderas till.

Utöver ovan nämnda bräschparametrar definierades även parametrar för Tousdammens geometri, såsom dammkrönets bredd samt sluttlutning uppströms respektive nedströms. Dessa värden erhölls skalenligt utifrån den typsektion av dammen som illustreras i figur 7. Se tabell 8 för en sammanfattning av erhållna värden. I samma tabell redovisas även övriga dammhaveriparametrar som användes i beräkningarna, vilka motiveras utifrån informationen i rapporten av Alcrudo & Mulet (2007).



Figur 7: Tousdammens typsektion, baserad på Alcrudo & Mulet (2007).

Tabell 6: Tousdammens materialegenskaper enligt Alcrudo & Mulet (2007).

	d_{50} [mm]	Torrtunghet [kN/m^3]	Friktionsvinkel [°]
Stenfyllning	240	18,55*	35
Tätkärna av lera	2	17	10

*beräknat utifrån Alcrudo & Mulet (2007) med antagen porositet 0,3.

För att beräkna bräschens utvecklingstid vilken måste definieras som indata i parametriska modeller (i detta fall Breacher), nyttjades empiriskt framtagna samband som tidigare presenterats i tabell 3. De beräknade utvecklingstiderna, som redovisas i tabell 7, jämfördes med den observerade tiden för bräschutveckling om 0,75 timmar enligt data från Alcrudo & Mulet (2007). Denna tid bedöms dock osäker. Sammantaget uppskattades bräschens utvecklingstid till cirka 1 timme.

Tabell 7: Uppskattningar av bräschens utvecklingstid för Tousdammen enligt historiskt framtagna empiriska samband.

Underlag	Medelbredd [m]	Utvecklingstid [h]
Froehlich (1995)	197	1,8
Froehlich (2008)	170	1,6
MacDonald & Langridge-Monopolis (1984)	263	2,4
Von Thun & Gilette (1990)	152	1,0 (svårt eroderbar) 0,6 (lätt eroderbar)

Tabell 8: Tousdammens antagna parametervärden i dammhaveriberäkningar.

Dammhaveriparameter	**Enhet**	**Ansats**
Bottenbredd trapetsformad bräschöppning	m	27
Dammkrönsnivå	möh	98,5
Bräschens bottennivå	möh	60
Bräschens sidolutning (H:1V)	-	1,6
Initial magasinnivå	möh	84
Vattennivå vid dammhaveri	möh	99
Dammkrönsbredd	m	55
Dammkrönslängd	m	150
Lutning uppströms (H:1V)	-	3,3
Lutning nedströms (H:1V)	-	1,5
Bräschens utvecklingstid	h	1
Dammstruktur	-	Breacher: Zonindelad med tätkärna Embrea: Homogen
Orsak till haveri	-	Överströmning
Bräschens utvecklingskurva	-	Sinusformad
Sedimenttransportekvation	-	Embrea: Yang (1979) Mike+: Engelund–Hansen (1967)

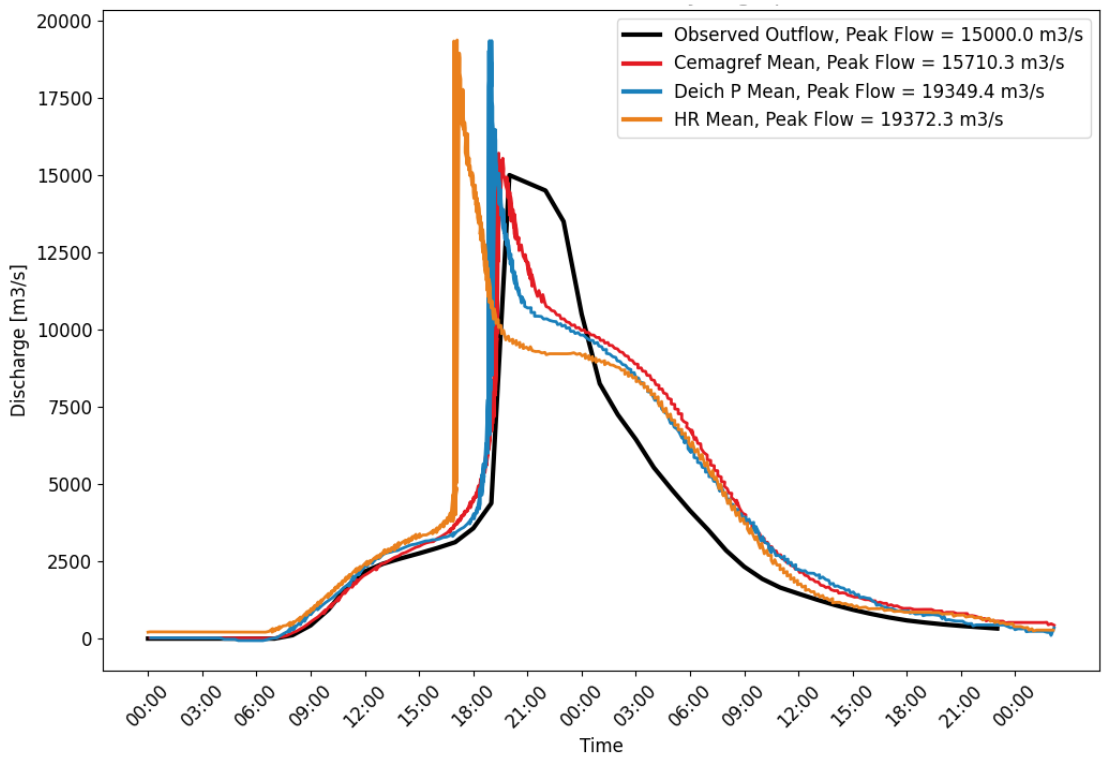
Utöver de specificerade parametervärdena i tabell 8 definierades även materialegenskaper i Embrea och Mike+, vilka redovisas i tabell 9. Dessa värden bygger delvis på Alcrudo & Mulet (2007), men har i vissa fall behövt uppskattas. Med hänsyn till behovet av att beskriva dammen som homogen med ett enhetligt material för beräkningarna i Embrea, uppskattades exempelvis medelkorndiametern d_{50} utifrån angivna värden i tabell 6 till 50 mm. Detta ansågs också som en rimilg ansats med tanke på att sedimenttransportekvationerna inte är anpassade för större partikelstorlekar än så.

Tabell 9: Tousdammens antagna materialparametrar i dammhaveriberäkningar.

Materialegenskap	**Enhet**	**Ansats**
d_{50}	mm	50
d_{30}	mm	10
d_{90}	mm	250
Friktionsvinkel	°	35
Porositet	-	0,3
Kohesion	kN/m^2	0
Torrtunghet	kN/m^3	18,55
Draghållfasthet	kN/m^2	0
Mannings n	-	0,03
Plasticitetsindex	-	0
Kritisk skjuvspänning	N/m^2	0,045
Relativ densitet	-	2,6
Sidoerosionsindex	-	1

3.2.1.2 Tidigare bräschmodellering av Tousdammen

Som en del av IMPACT-projektet för Tousdammen har tre organisationer – HR Wallingford, UniBW (modell Deich P i figur 8) och Cemagref – tidigare genomfört bräschmodelleringar av Tousdammen. Samtliga använde 1D-modeller och genomförde Monte Carlo-simuleringar där centrala parametrar varierades för att belysa osäkerheter i resultatet. Medelvärdeshydrograferna från varje organsiations beräkningar presenteras i figur 8 tillsammans med den observerade kurvan för Tousdammen, vilka används i senare delar av examensarbetet för att validera resultaten av beräkningarna. Samtliga simulerade hydrografer uppvisar en tydligt spetsigare flödestopp än den observerade. Två av organisationerna, HR Wallingford och UniBW, överskattar maxflödet med 30 % till ett genomsnitt på drygt 19000 m^3/s. Den tredje organisationen, Cemagref, ligger närmare det observerade utfallet med ett beräknat maxflöde på cirka 15700 m^3/s. Cemagref återger även tidpunkten för haveriets initiering mer träffsäkert, till skillnad från de övriga två som tenderar att tidigarelägga händelseförloppet.



Figur 8: Medelvärdeshydrografer från Monte Carlo-beräkningar av utflödet vid haveri av Tousdammen utförda av HR Wallingford, UniBW och Cemagref inom IMPACT-projektet, i jämförelse med observerad utflödeskurva.

3.2.2 Fallstudie 2: Fälttestdamm 2-2002

För att komplettera analyserna i examensarbetet användes en ytterligare fallstudie: ett fälttest genomfört inom IMPACT-projektet med data tillgänglig av Morris och Hassan (2007) samt (Höeg et al., u.å.). Fälttestet, benämnt 2-2002, var ett fullskaleförsök med en fem meter hög homogen jordfyllningsdamm av grus, specifikt anlagd vid en försöksplats nedströms Røssvassdammen i Nordland fylke, Norge (figur 9) (Morris & Hassan, 2007). Dammkroppen bestod av olika grusmaterial vars siktkurva fanns tillgänglig, och var konstruerad för att möjliggöra datainsamling över inflöde, utflöde och bräschutveckling (Höeg et al., u.å.). Haveriet initierades genom överströmning där flödet gradvis ökades från 30 till 50 l/s under 45 minuter genom en 2 meter bred öppning. Den vertikala erosionen för bräschutvecklingen avslutades inom fem minuter efter dess initiering, medan den horisontella erosionen fortskred i ytterligare cirka fem till tio minuter (ibid.).

Figur 9: Försöksområde för fälttest 2-2002 nedströms Røssvassdammen, Norge (Morris & Hassan, 2007), återgiven med tillåtelse.

3.2.2.1 Uppskattning av fälttest 2-2002:s dammhaveriparametrar

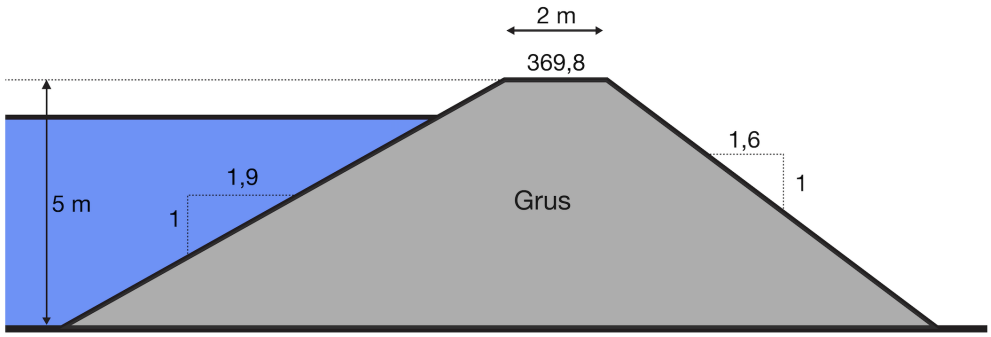
Utifrån den tillgängliga dokumentationen från fälttestet kunde samtliga nödvändiga mätdata erhållas för att fastställa relevanta dammhaveriparametrar. Dessa parametrar utgjorde grunden för modellberäkningarna och redovisas i tabell 11 och 12 nedan.

Bräschens utvecklingstid uppskattades till 10 minuter utifrån den observerade tiden för haveriförloppet samt de beräknade tiderna utifrån de empiriska ekvationerna tidigare introducerade i tabell 3, vilka presenteras i tabell 10.

Tabell 10: Uppskattningar av bräschens utvecklingstid för fälttest 2-2002 enligt historiskt framtagna empiriska samband.

Underlag	**Medelbredd [m]**	**Utvecklingstid [min]**
Froehlich (1995)	9,6	8,7
Froehlich (2008)	11,2	12,2
MacDonald & Langridge-Monopolis (1984)	20,9	106,7
Von Thun & Gilette (1990)	18,9	4,6 (svårt eroderbar) 21,1 (lätt eroderbar)

Den slutligt uppnådda bräschbotten estimerades till 12 meter baserat på fotografier av händelseförloppet och vetskap om att dammens totala längd var 40 meter, samt beräknade värden från de empiriska ekvationerna i tabell 3 redovisade i tabell 10. Utifrån fotografierna observerades även mycket vertikala sidoväggar av bräschöppningen, vilket motiverade ansättningen av bräschens sidolutning i beräkningarna som mycket brant med ett värde på 0,2. Parametrar för dammens geometri presenteras i tabell 11 och angavs efter figur 10, som visar en tvärsektion av dammen konstruerad för fälttestet.



Figur 10: Fälttestdamm 2-2002:s typsektion, baserad på Höeg et al. (u.å.).

Tabell 11: Fälttestdamm 2-2002 antagna parametervärden i dammhaveriberäkningar.

Dammhaveriparameter	**Enhet**	**Ansats**
Bottenbredd rektangulär bräschöppning	m	12
Dammkrönsnivå	möh	369,8
Bräschens bottennivå	möh	364,8
Bräschens sidolutning (H:1V)	-	0,2
Initial magasinnivå	möh	369,78
Vattennivå vid dammhaveri	möh	369,91
Dammkrönsbredd	m	2
Dammkrönslängd	m	40
Lutning uppströms (H:1V)	-	1,9
Lutning nedströms (H:1V)	-	1,6
Bräschens utvecklingstid	h	0,17 (=10,2 min)
Dammstruktur	-	Homogen
Orsak till haveri	-	Överströmning
Bräschens utvecklingskurva	-	Sinusformad
Sedimenttransportekvation	-	Embrea: Meyer-Peter-Müller för friktionsjordar (Fread, 1988)

Utöver de specificerade parametervärdena i tabell 11 definierades även materialegenskaper i Embrea, vilka redovisas i tabell 12. Dessa värden bygger delvis på (Höeg et al., u.å.), men har i vissa fall behövt uppskattas. De angivna partikelstorlekarna i tabell 12 för grusmaterialet i den homogena dammen estimerades från en siktkurva för grusdammen angiven av Höeg et al. (u.å.).

Tabell 12: Fälttestdamm 2-2002:s antagna parametervärden för materialegenskaper i dammhaveriberäkningar.

Materialegenskap	**Enhet**	**Ansats**
d_{50}	mm	4,75
d_{30}	mm	2,5
d_{90}	mm	35
Friktionsvinkel	°	42
Porositet	-	0,22
Kohesion	kN/m^2	0,9
Torrtunghet	kN/m^3	21,2
Draghållfasthet	kN/m^2	0
Mannings n	-	0,03
Plasticitetsindex	-	0
Kritisk skjuvspänning	N/m^2	0,045
Relativ densitet	-	2,6

3.3 Beräkningsmetodik

Beräkningsmetodiken för de två valda fallstudierna indelades som tidigare nämnt i två huvudsakliga faser. Den första fasen utgjordes av ett deterministiskt tillvägagångssätt där utvalda programvaror användes för att undersöka om resultaten från beräkningarna med givna parametrar låg inom samma storleksordning som de observerade haverierna. I den andra fasen genomfördes mer omfattande stokastiska analyser, där parametrar samplades slumpmässigt inom definierade intervall, återigen med hjälp av samma programvaror.

3.3.1 Fallstudie 1: Tousdammen

3.3.1.1 Breacher

I de inledande deterministiska beräkningarna för Tousdammen angavs inflödeshydrograf, magasinkurva samt utskovets avbördningskurva. Dammstrukturen definierades som zonerad. Vidare angavs dammhaveriparametrar såsom dammkrönsnivå, initial magasinnivå, vattennivå vid dammhaveri, krönbredd samt lutning uppströms och nedströms enligt värdena i tabell 8. Bräschens geometri, inklusive bottenbredd, sidolutning, bottennivå och utvecklingstid, specificerades enligt beräknade värden (se tabell 8) för att validera modellen mot tillgänglig historisk data för haveriet av Tousdammen.

Därefter genomfördes stokastiska simuleringar med antagande om en trapetsformad bräschöppning. För samtliga beräkningar tilläts obestämda parametrar variera enligt likformiga sannolikhetsfördelningar mellan intervallen presenterade i tabell 13.

Tabell 13: Intervall för stokastiskt varierande bräschparametrar för Tousdammen i Breacher.

Dammhaveriparameter	**Enhet**	**Sannolikhetsfördelning**	**Parameterintervall**
Bottenbredd trapetsformad bräschöppning	m	Likformig	[15; 60]
Bottennivå	möh	Likformig	[50; 70]
Bräschens utvecklingstid	h	Likformig	[0,5; 4]
Bräschens sidolutning (H:1V)	-	Likformig	[0,7; 1,8]
Vattennivå vid dammhaveri	möh	Likformig	[98,5; 99]
Överfallskoefficient C	-	Likformig	[1,2; 1,6]

För att analysera resultatet av de stokastiska beräkningarna genomfördes slutligen en osäkerhets- och känslighetsanalys. Med hjälp av SALib, ett Python-bibliotek för global känslighetsanalys, kvantifierades parametrarnas relativa påverkan på modellens maxflöde för att identifiera vilka parametrar som hade störst påverkan på resultatet. Första ordningens känslighetsindex beräknades för att visa hur stor del av variationen i maxflödet som kunde förklaras av en enskild parameter (SALib, 2025). För att ytterligare analysera sambandet mellan varje parameter och maxflödet anpassades även en linjär regressionslinje till resultaten, där determinationskoefficienten R^2 angav ett mått på hur stor andel av datan som kunde förklaras med regressionsmodellen.

3.3.1.2 Embrea

I Embrea genomfördes inledningsvis deterministiska dammhaveriberäkningar för samtliga av programvarans tillgängliga sedimenttransportekvationer. Samtliga parametervärden specificerades enligt tabell 8 och tabell 9 i beräkningarna. Liksom i Breacher specificerades även dammens inflödeshydrograf, magasinkurva och avbördningskurva. Därutöver angavs en nedströms flödeskurva i modellen, vilken valdes så att det utströmmande flödet inte begränsades nedströms i beräkningarna. Efter detta analyserades även de enskilda parametrarnas inverkan på modellresultatet för respektive sedimenttransportekvation genom deterministisk variation. Syftet var att identifiera både vilka parametrar och vilka ekvationer som var mest känsliga, och därmed relevanta för vidare stokastiska analyser.

Följaktligen kunde stokastiska dammhaveriberäkningar genomföras där de parametrar för materialegenskaper som i de tidigare deterministiska beräkningarna visade signifikant påverkan på resultaten, det vill säga medelkorndiametern (d_{50}) och friktionskoefficienten (Mannings n), tilläts variera inom givna osäkerhetsintervall. Först varierades parametrarna enligt en likformig sannolikhetsfördelning, och därefter en triangulär sannolikhetsfördelning, se tabell 14. Sedimenttransportekvationen som tillämpades för dessa beräkningar var Yang (1979), eftersom att denna ekvation varierar med d_{50} och även indirekt av Mannings n.

Tabell 14: Intervall för stokastiskt varierande bräschparametrar för Tousdammen i Embrea.

Dammhaveriparameter	**Enhet**	**Sannolikhetsfördelning**	**Parameterintervall**
Mannings n	-	Likformig Triangulär	[0,03; 0,05] [0,03; 0,04; 0,05]
d_{50}	mm	Likformig Triangulär	[30; 70] [30; 50; 70]

3.3.1.3 Mike+

I Mike+ var inte stokastiska beräkningar möjliga, samtliga beräkningar i denna del av arbetet utfördes därmed deterministiskt. Syftet var att etablera en referensram baserad på en renommerad programvara för att stärka arbetets relevans och validitet.

En 1D-modell av Tousdammen utvecklades i Mike+ med syfte att likna en box-modell så långt som möjligt för att möjliggöra en jämförbar analys av beräkningarna med de andra två box-modellerna Breacher och Embrea. Detta gjordes genom att sätta upp en 1D-modell som bestod av två grenar: en huvudgren som representerade magasinvolymen, uppdämningen och floden nedströms, och en sidogren som representerade utskovet. Istället för att använda höjdnivådata och en magasinkurva för att modellera vattenmagasinet uppströms, och till skillnad från beräkningarna i Breacher och Embrea där magasinkurvan definierades direkt, definierades en serie tvärsektioner längs huvudgrenen dimensionerade så att den resulterande volymen motsvarade en representativ magasinkurva. Tousdammens inflödeskurva samt utskovets avbördningskurva specificerades dock precis likt tidigare som randvillkor till modellen. Nedströms dammen definierades en bottenprofil med låg gradient och fritt utflöde för att inte begränsa flödet i beräkningarna. Initieringen av dammhaveriet angavs till då magasinnivån uppströms dammen uppgick till 99 meter över havet och beräkningarna specificerades som fysiskt baserade. Dammens parametervärden angavs således enligt tidigare angivet i tabell 8 och 9.

Inledningsvis genomfördes precis som i de andra programvarorna deterministiska beräkningar för att modellera dammens totala utflödeshydrograf nedströms och validera denna dels med tillgängliga observerade data från det faktiska haveriförloppet, dels med motsvarande simuleringar från Breacher och Embrea.

För att efterlikna effekten av stokastiska variationer genomfördes därefter en serie deterministiska känslighetsanalyser, där en parameter i taget varierades inom angivna intervall (se tabell 15). De parametrar som analyserades utgjordes av dammens medelkorndiameter (d_{50}) och bräschens bottennivå.

Tabell 15: Intervall för deterministiska variationer av dammhaveriberäkningar för Tousdammen i Mike+.

Dammhaveriparameter	**Enhet**	**Parameterintervall**
d_{50}	mm	[0,001; 250]
Bräschens bottennivå	möh	[50; 70]

3.3.2 Fallstudie 2: Fälttest 2-2002

Då Embrea är en fysikaliskt baserad modell där dammhaveriberäkningarna utgår från erosionsmekanismer, visade sig tillförlitligheten vara begränsad vid beräkningar för större dammar med grovkorniga material, såsom Tousdammen. För att öka validiteten i metodens tillämpning genomfördes kompletterande beräkningar i Breacher och Embrea för den mindre dammen i fälttest 2-2002, del av det europeiska forskningsprojektet IMPACT.

3.3.2.1 Breacher

Beräkningarna för fälttest 2-2002 genomfördes i Breacher med en metodik liknande den som tillämpades för Tousdammen. Dammens inflödeskurva, magasinkurva och avbördningskurva specificerades. Eftersom dammen saknade utskov eller annan avbördningsstruktur sattes utflödet vid varje tidpunkt till noll i sistnämnda kurva. Dammstrukturen modellerades som homo-

gen, och övriga dammhaveriparametrar angavs enligt tabell 11. Resultatet validerades därefter mot den observerade utflödeshydrografen från fälttestet.

Därefter genomfördes stokastiska dammhaveriberäkningar där de parametrar som tilläts variera följde likformiga sannolikhetsfördelningar enligt tabell 16. En känslighetsanalys utfördes återigen med hjälp av Python-biblioteket SALib där parametrarnas relativa påverkan på modellens maxflöde kvantifierades.

Tabell 16: Intervall för stokastiskt varierande bräschparametrar för fälttestdamm 2-2002 i Breacher.

Dammhaveriparameter	**Enhet**	**Sannolikhetsfördelning**	**Parameterintervall**
Bottenbredd rektangulär bräschöppning	m	Likformig	[6; 24]
Bottennivå	möh	Likformig	[364,8; 365,3]
Bräschens utvecklingstid	h	Likformig	[0,08; 0,3]
Bräschens sidolutning (H:1V)	-	Likformig	[0,01; 0,5]
Vattennivå vid dammhaveri	möh	Likformig	[369,8; 369,92]
Överfallskoefficient C	-	Likformig	[1,2; 1,6]

3.3.2.2 Embrea

Inledningsvis definierades randvillkoren i modellen i form av inflödeshydrograf, avbördningskurva och nedströms begränsande förhållanden. Parametervärden för dammaterialets egenskaper samt damm- och bräschgeometri angavs enligt tidigare redovisade tabeller 11 och 12.

Därefter genomfördes deterministiska beräkningar för samtliga tillgängliga sedimenttransportekvationer i programmet. De resulterande utflödeshydrograferna från respektive beräkning jämfördes med observerad data från fälttestet. Två stokastiska beräkningar genomfördes sedan för att fånga modellens respons under variabla förhållanden. Detta genom att de två centrala materialparametrarna d_{50} och Mannings n varierade inom givna osäkerhetsintervall (se tabell 17), precis som för Tousdammen enligt en likformig och därefter en triangulär sannolikhetsfördelning. Övriga parametrar hölls konstant oförändrade enligt tidigare specificerade värden. Sedimenttransportekvationen som tillämpades för dessa beräkningar var Meyer-Peter-Müller för friktionsjord (Fread, 1988), eftersom att denna varierar med d_{50} och Mannings n (se tabell 5).

Tabell 17: Intervall för stokastiskt varierande bräschparametrar för fälttest 2-2002 i Embrea.

Dammhaveriparameter	**Enhet**	**Sannolikhetsfördelning**	**Parameterintervall**
Mannings n	-	Likformig Triangulär	[0,03; 0,05] [0,03; 0,04; 0,05]
d_{50}	mm	Likformig Triangulär	[3; 7] [3; 5; 7]

4 Resultat

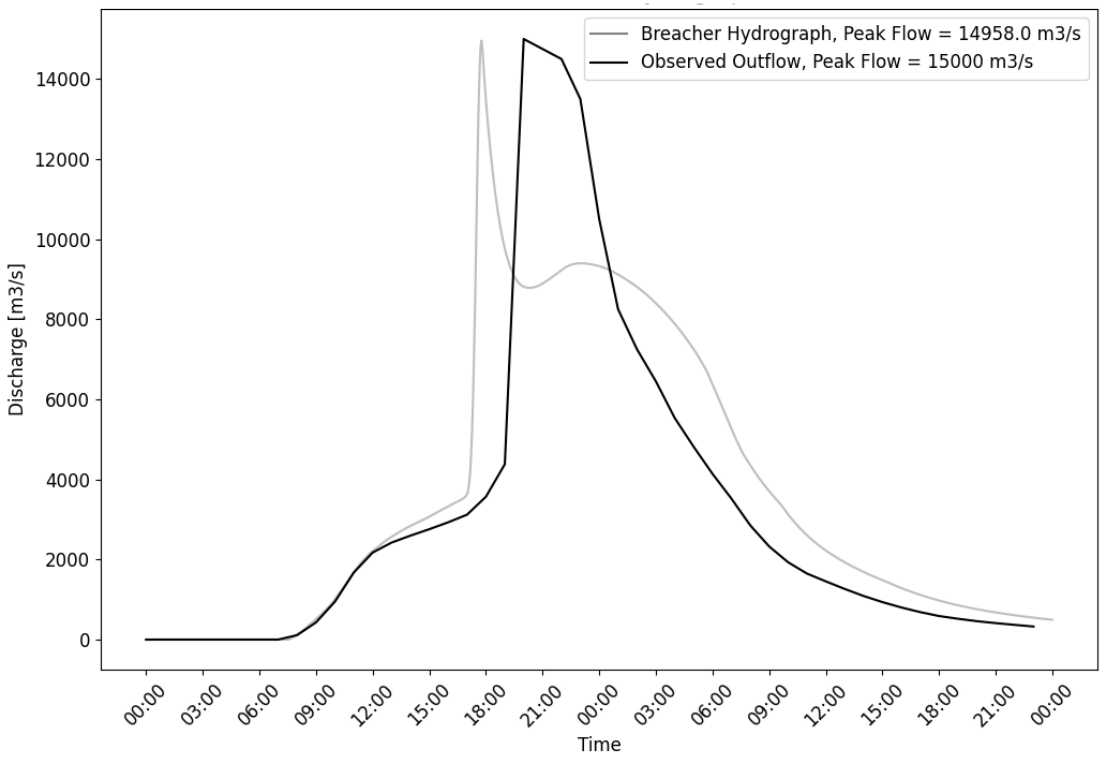
I detta avsnitt presenteras resultaten från de dammhaveriberäkningar som utfördes för de två fallstudierna med programvarorna Breacher, Embrea och Mike+.

4.1 Fallstudie 1: Tousdammen

I fallstudie 1 redovisas resultaten från dammhaveriberäkningarna för Tousdammen. Inledningsvis presenteras de deterministiska beräkningar som genomförts i respektive programvara, där målet var att så noggrant som möjligt återskapa det faktiska dammhaveriförloppet. Därefter presenteras de stokastiska beräkningarna, genomförda för att utvärdera de probabilistiska metoderna som tillämpades i de olika programvarorna.

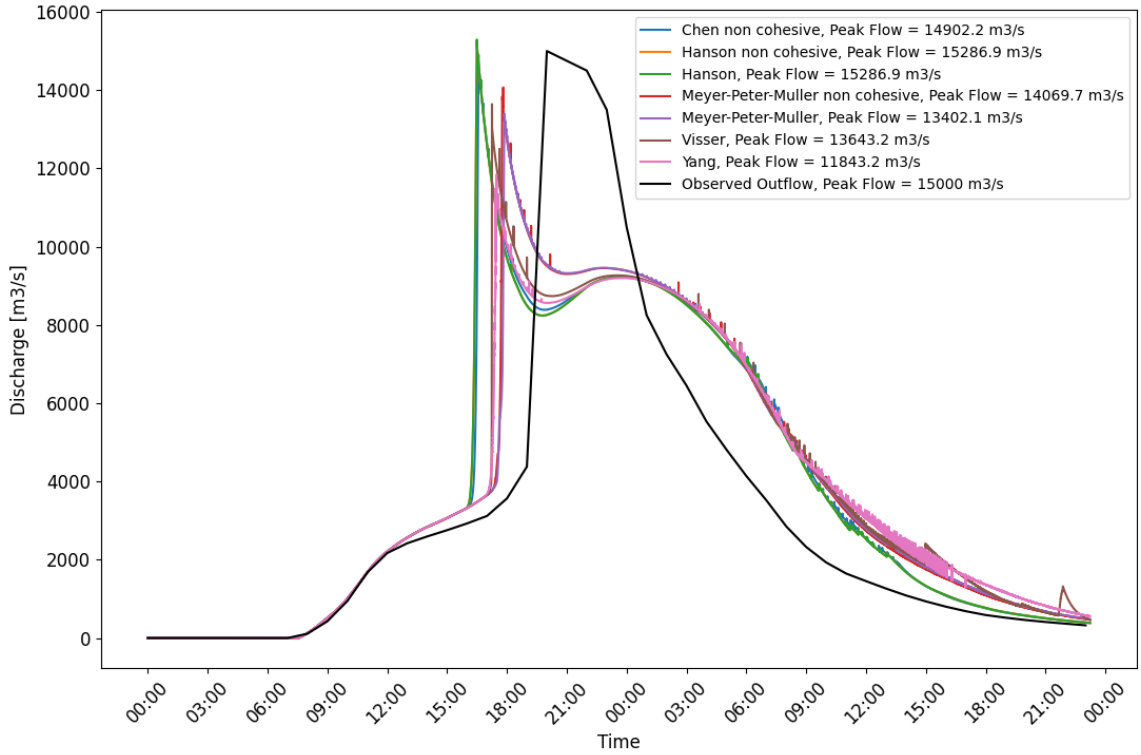
4.1.1 Deterministiska beräkningar

Vid de deterministiska dammhaveriberäkningarna av Tousdammen i Breacher, där samtliga indata valdes för att så nära som möjligt efterlikna det faktiska dammhaveriet, erhölls en utflödeshydrograf enligt figur 11. Överlag överensstämmer formen på den beräknade hydrografen väl med den observerade, där de maximala flödena uppnår snarlika värden. Jämfört med den observerade hydrografen inträffade dock flödestoppen i den beräknade hydrografen cirka tre timmar tidigare, med ett snabbt avtagande flöde efter detta. Detta skiljer sig från det observerade förloppet där flödestoppen är bredare och mer utdragen. Dessutom skiljer sig formen på hydrograferna åt med hänsyn till att den beräknade hydrografen uppvisar en sekundär ökning i utflöde kring kl. 21:00. Detta motsvarar en form som i den beräknade hydrografen liknar en ”mage”, och som inte återfinns i den observerade hydrografen.



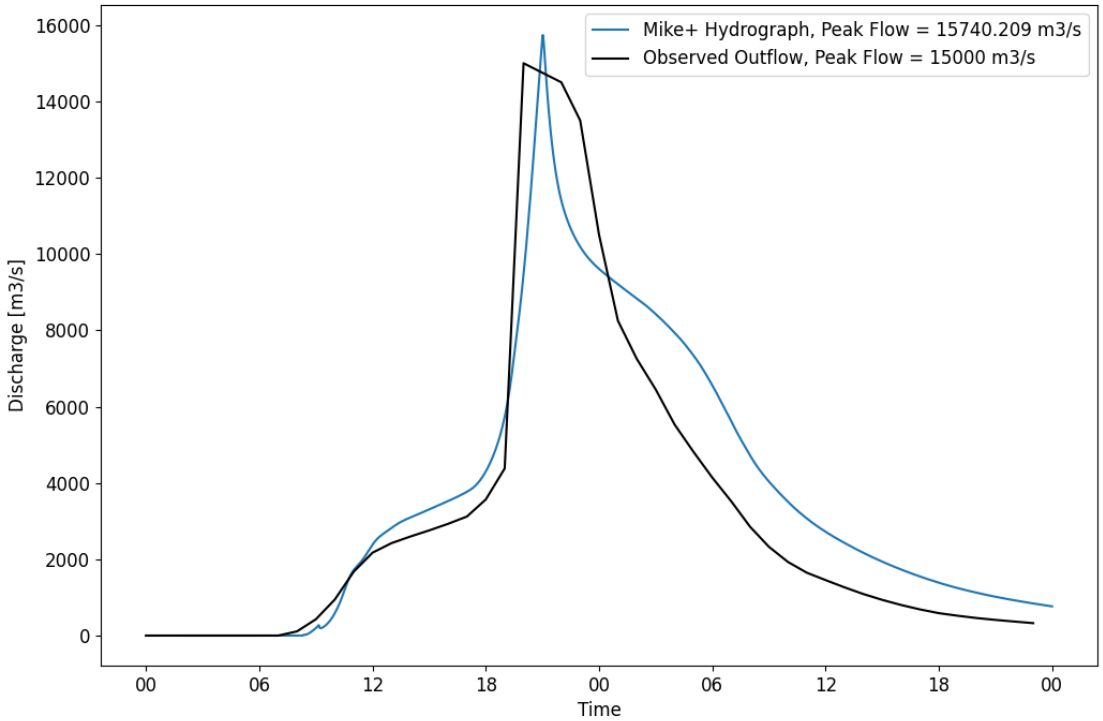
Figur 11: Utflödeshydrograf från en deterministisk dammhaveriberäkning av Tousdammen i Breacher, jämfört med den observerade utflödeshydrografen från det verkliga dammhaveriet.

I Embrea resulterade de deterministiska dammhaveriberäkningarna för Tousdammen i utflödeshydrografer som till stor del liknar de som erhölls i Breacher (figur 12). Även här uppvisar resultaten liknande avvikelser, med tidigare inträffade maxflöden där flödestopparna är smalare och mer abrupta än i den observerade hydrografen, samt förekomsten av de sekundära ökningarna i utflödet. Beroende på vilken sedimenttransportekvation som användes i beräkningarna visas i figuren något förändrade utflödeshydrografer, där Chen (1986) gav det närmsta korrekta maxflödet, medan Meyer-Peter-Müller (Fread, 1988) tidsmässigt gav det närmsta korrekta resultatet med en initiering av haveri runt kl 18:00.



Figur 12: Utflödeshydrografer från deterministiska dammhaveriberäkningar av Tousdammen i Embrea för alla möjliga sedimenttransportekvationer, jämfört med den observerade utflödeshydrografen från det verkliga dammhaveriet.

Dammhaveriberäkningarna för Tousdammen i Mike+ resulterade i en utflödeshydrograf vars form mycket nära följde den observerade, se figur 13. Särskilt tydligt är detta genom den goda överensstämmelsen i tidpunkten för haveriets initiering samt det maximalt uppnådda flödet. Den karaktäristiska magen för den beräknade utflödeshydrografen, som identifierades i resultaten från de två övriga programvarorna, återfinns även i resultatet av Mike+-beräkningarna. Dock noteras att trenden är mindre i jämförelse - beräkningarna resulterade endast i en mindre avtagande kurva snarare än en sekundär ökning av kurvan och flödet. Denna iakttagelse följer av det senare inträffade maxflödet. Likaså återfinns även den abrupta flödestoppen i resultatet av beräkningarna i Mike+.

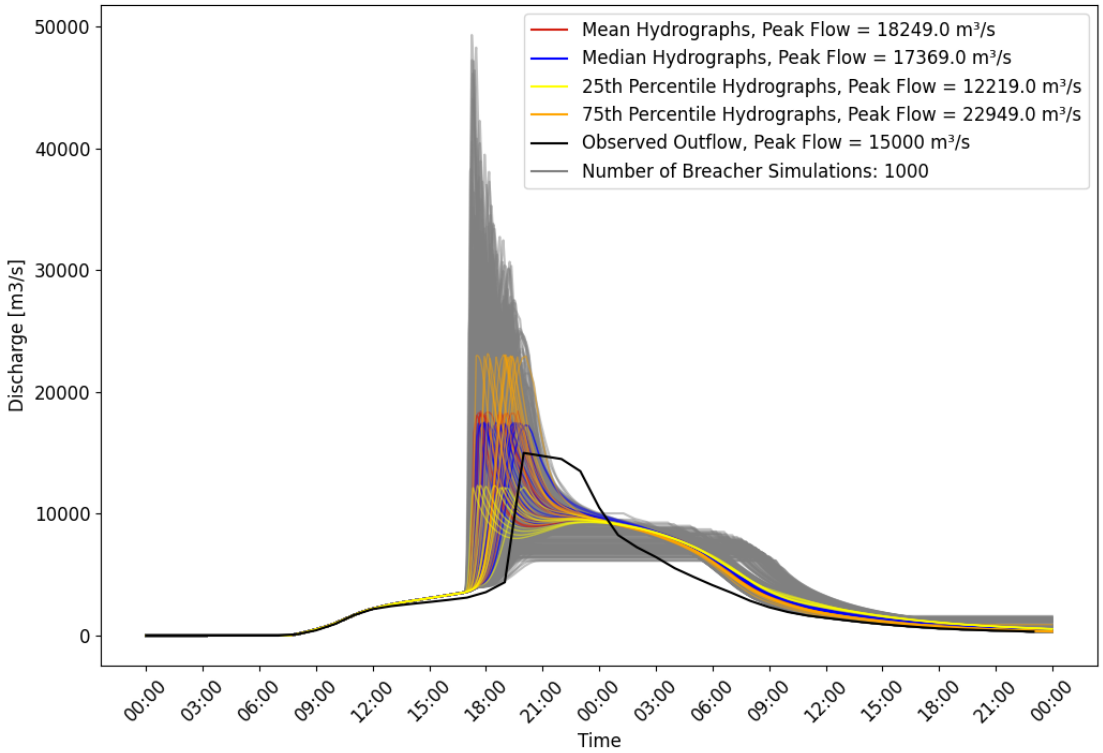


Figur 13: Utflödeshydrograf från en deterministisk dammhaveriberäkning av Tousdammen i Mike+, jämfört med den observerade utflödeshydrografen från det verkliga dammhaveriet.

Vid jämförelse av samtliga ovan beräkningar med modellberäkningarna i IMPACT som visades i figur 8 konstateras att utflödeshydrograferna har mycket mer liknande former än vid jämförelse med den observerade,samt ligger inom samma osäkerhetsintervall på ± 30 %. De programvaror som användes i arbetet presterar således på ett liknande sätt som de beräkningsmodeller som användes i IMPACT.

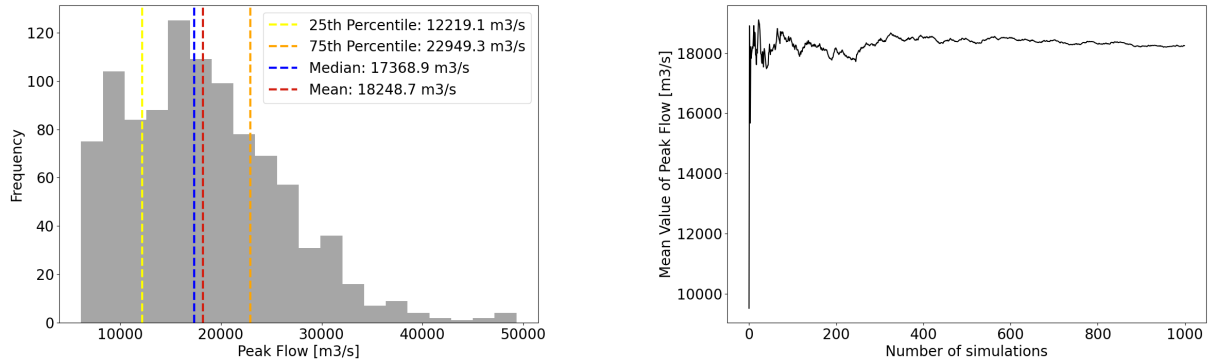
4.1.2 Stokastiska beräkningar

I de stokastiska beräkningarna för Tousdammen i Breacher varierades de specificerade parametrarna inom definierade intervall i 1000 simuleringar. De resulterande utflödeshydrograferna för varje individuell beräkning presenteras som grå kurvor i figur 14. För att belysa variationen i resultaten markeras de utflödeshydrografer vars maxflöde ligger inom ett intervall på ±1% från medelvärdet av alla 1000 simuleringar med röda kurvor. Dessa kurvor representerar således de beräkningar vars flödestopp ligger nära det genomsnittliga maxflödet. Vidare visas mediangraferna inom samma intervallgränser som blå kurvor, medan utflödeshydrograferna för den 25:e respektive 75:e percentilen presenteras med kurvor i gult och oranget. För jämförelse presenteras även den observerade utflödeshydrografen för Tousdammen enligt svart kurva i figur 14, vilket möjliggör en visuell bedömning av hur de stokastiska beräkningsresultaten förhåller sig till denna.



Figur 14: Utflödeshydrografer från stokastiska dammhaveriberäkningar av Tousdammen i Breacher, jämfört med den observerade utflödeshydrografen från det verkliga dammhaveriet.

För att redovisa spridningen i resultaten från de stokastiska beräkningarna presenteras även två olika fördelningsdiagram. Ett histogram över variationen i beräkningarnas maxflöden visas i figur 15a tillsammans med kompletterande figur 15b som illustrerar hur dessa värden konvergerar. Ett färgkodat spridningsdiagram visas vidare i figur 16 för att åskådliggöra sambandet mellan bräschens utvecklingstid och bottenbredd, där färgen representerar respektive beräknings maxflöde.



(a) Fördelningshistogram över Tousdammens uppnådda maxflöden i Breacher.

(b) Konvergensanalys av medelvärdet av Tousdammens maxflöden i Breacher.

Figur 15: Resultat från 1000 stokastiska beräkningar av Tousdammens maxflöde i Breacher.

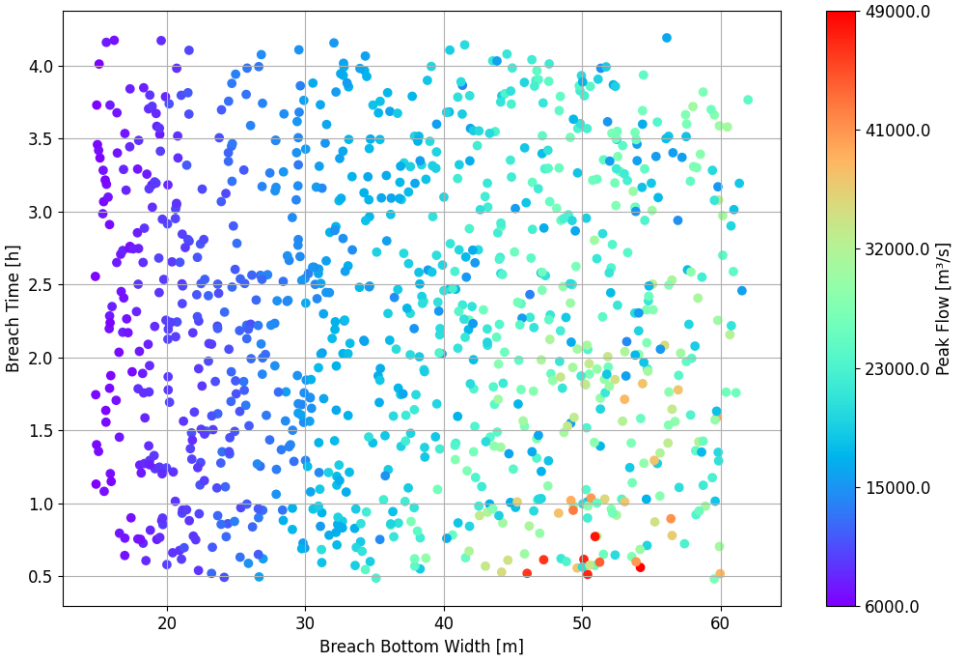
Histogrammet i figur 15a uppvisar en koncentration av resultat kring både medel- och medi-

anvärdet, med en avtagande frekvens för högre, överskattade maxflöden. Tillhörande figur 15b ger en bild av hur snabbt beräkningarna stabiliseras, och utifrån figuren kan det konstateras att 1000 stokastiska beräkningar är tillräckliga för att uppnå konvergens. Den statistiska fördelningen av Tousdammens maxflöden som illustreras i histogrammet sammanfattas därtill i tabell 18, där medelvärde, standardavvikelse, samt minsta och största uppmätta värde redovisas.

Tabell 18: Resultatfördelning av Tousdammens uppnådda maxflöde från 1000 stokastiska beräkningar i Breacher där dammhaveriparametrar varierades slumpmässigt enligt *likformiga* fördelningar.

Dammhaveriparameter	**Enhet**	**Min**	**Max**	$\boldsymbol{\mu}$	$\boldsymbol{\sigma}$
Maxflöde	m^3/s	6134,6	49318,4	18248,7	7673,7

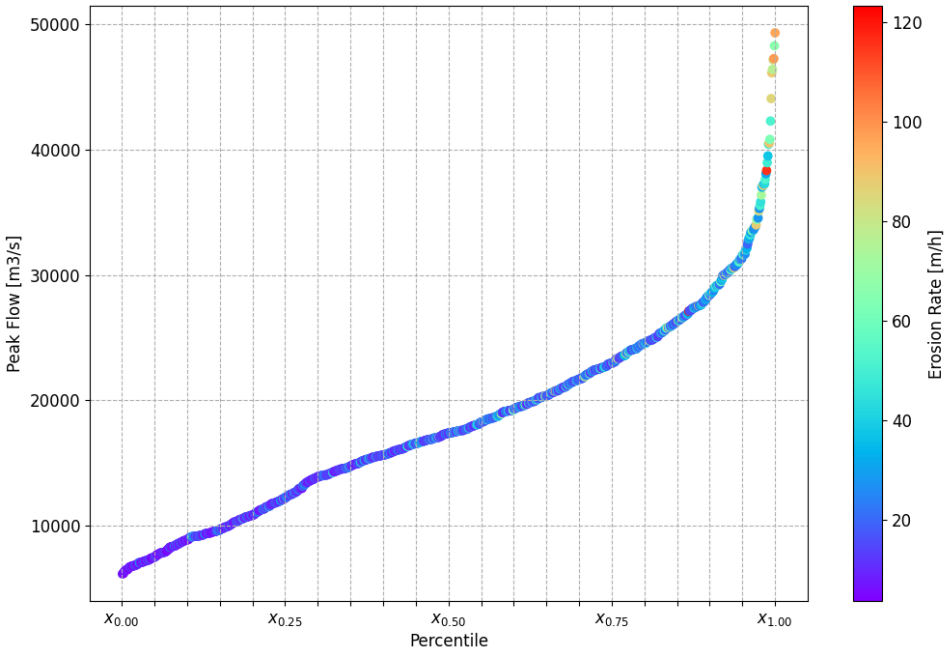
Spridningsdiagrammet i figur 16 visar vidare att en ökad bottenbredd av bräschen generellt leder till ett högre maxflöde, oberoende av utvecklingstid. De största maxflödena uppstår dock vid en kombination av stor bottenbredd och kort utvecklingstid, vilket indikerar att ett snabbt och omfattande bräschförlopp har störst inverkan på maxflödet i beräkningarna.



Figur 16: Spridningsdiagram över bräschens bottenbredd och utvecklingstid, färgkodat efter maxflöde, från 1000 stokastiska beräkningar av Tousdammen i Breacher.

För att illustrera osäkerheterna i resultaten från de stokastiska beräkningarna presenteras en färgkodad percentilkurva över maxflödena i figur 17. Kurvan möjliggör en direkt koppling mellan ett visst maxflöde och dess motsvarande percentil, vilket innebär att det specifika flödet utgör ett övre gränsvärde för det antal beräkningar som resulterade i ett maxflöde mindre eller är lika med detta värde. På så sätt visualiseras fördelningen av beräknade maxflöden i relation till deras sannolikhet. Färgkodningen i figuren återspeglar variationen i erosionsförloppet, där en mörkare blå nyans representerar beräkningar med mindre bräschbredd och längre ut-

vecklingstid motsvarande låga erosionshastigheter [m/h], medan rödare nyanser indikerar en snabbare erosion med bredare bräsch och kortare utvecklingstid.



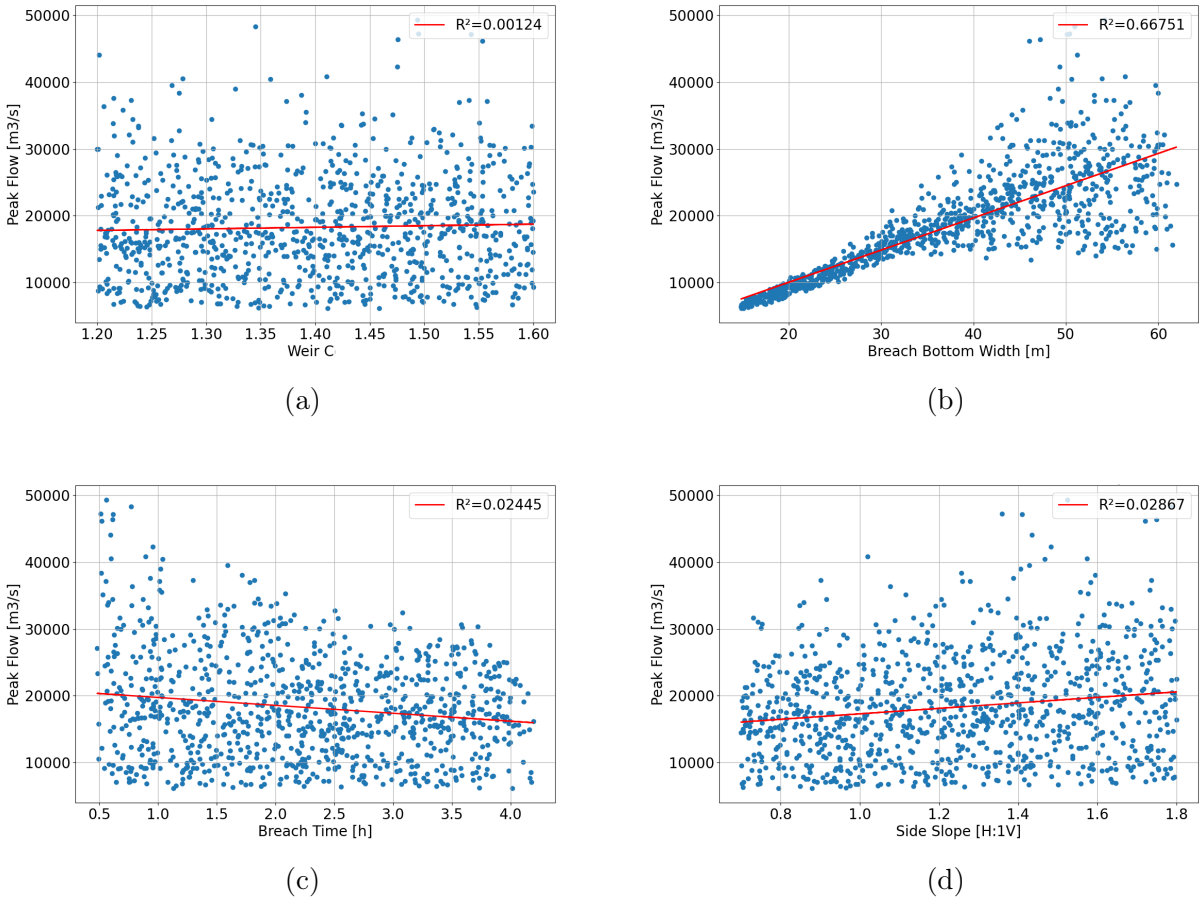
Figur 17: Percentilkurva för Tousdammens maxflöde från 1000 stokastiska beräkningar i Breacher, färgkodad efter erosionshastighet.

Från figur 17 visas hur uppnådda maxflöden från beräkningarna är linjärt fördelade från låga maxflöden upp till den 90:e percentilen, och med en färgskala som indikerar rimliga erosionshastigheter. Däremot observeras de 10 % högsta maxflödena innefatta stora osäkerheter, där färre beräkningar med orealistiskt höga maxflöden, orsakade av höga erosionshastigheter, erhålls.

Som ett komplement till percentilkurvan redovisas även en känslighetsanalys som belyser de ingående parametrarnas relativa inverkan på det beräknade maxflödet. Figur 18 visar att bräschens bottenbredd har störst inverkan på resultatet, med ett s.k. första ordningens känslighetsindex nära 0,7. Detta innebär att en variation av bräschbredden enskilt påverkar variationen i maxflödet med 70%, givet att övriga parametrar hålls konstanta. Övriga parametrar uppvisar betydligt lägre känslighetsindex, vilket tyder på en mer begränsad påverkan på resultatet.

Figur 18: Första ordningens känslighetsindex för parametrar i de stokastiska dammhaveriberäkningarna för Tousdammen, där varje parameters relativa bidrag till variationen i maxflödet visas.

Dessa resultat illustreras även med separata spridningsdiagram mellan maxflödet och respektive parameter i figur 19, vilket möjliggör en visuell analys av de olika sambanden. Det framgår tydligt att maxflödet har ett nära linjärt samband med bräschens bottenbredd, vilket bekräftas av en hög R^2-koefficient för regressionslinjen. Detta överensstämmer med det tidigare konstaterade höga känslighetsindexet för bottenbredden, och bekräftar således parameterns dominerande inverkan på maxflödets variation. I kontrast uppvisar övriga parametrarna mycket svagare korrelation med maxflödet, vilket ytterligare bekräftar deras begränsade inverkan för maxflödet. Regressionslinjerna åskådliggör även vilka samband som råder mellan maxflödet och respektive parameter; resultaten visar exempelvis att en större bottenbredd leder till högre maxflöden, medan ett längre förlopp för bräschutvecklingen resulterar i lägre maxflöden.



Figur 19: Spridningsdiagram över maxflöde och a) överfallskoefficient C, b) bräschens slutliga bottenbredd, c) brächens utvecklingstid och d) bräschens sidolutning, med presenterad linjär regressionslinje och angivet R^2-värde.

I de stokastiska dammhaveriberäkningarna för Tousdammen i Embrea varierades parametrarna Mannings n och d_{50} enligt två olika sannolikhetsfördelningar: först en likformig och därefter en triangulär fördelning, inom de intervall som specificerades i tabell 14. Eftersom Embrea inte tillät export eller visualisering av utflödeshydrografer för varje enskild beräkning, redovisas resultaten i form av beräkningarnas sammanfattande statistik. Fördelningarna av de beräknade resultatparametrarna för varje fall presenteras med medelvärde, standardavvikelse, samt minsta och största uppmätta värde i tabell 19 respektive 20.

Tabell 19: Resultatfördelningar av slutliga uppnådda dammhaveriparametrar från 100 stokastiska beräkningar med sedimenttransportekvation Yang (1979) i Embrea, där Mannings n och d_{50} varierades slumpmässigt enligt *likformiga* fördelningar.

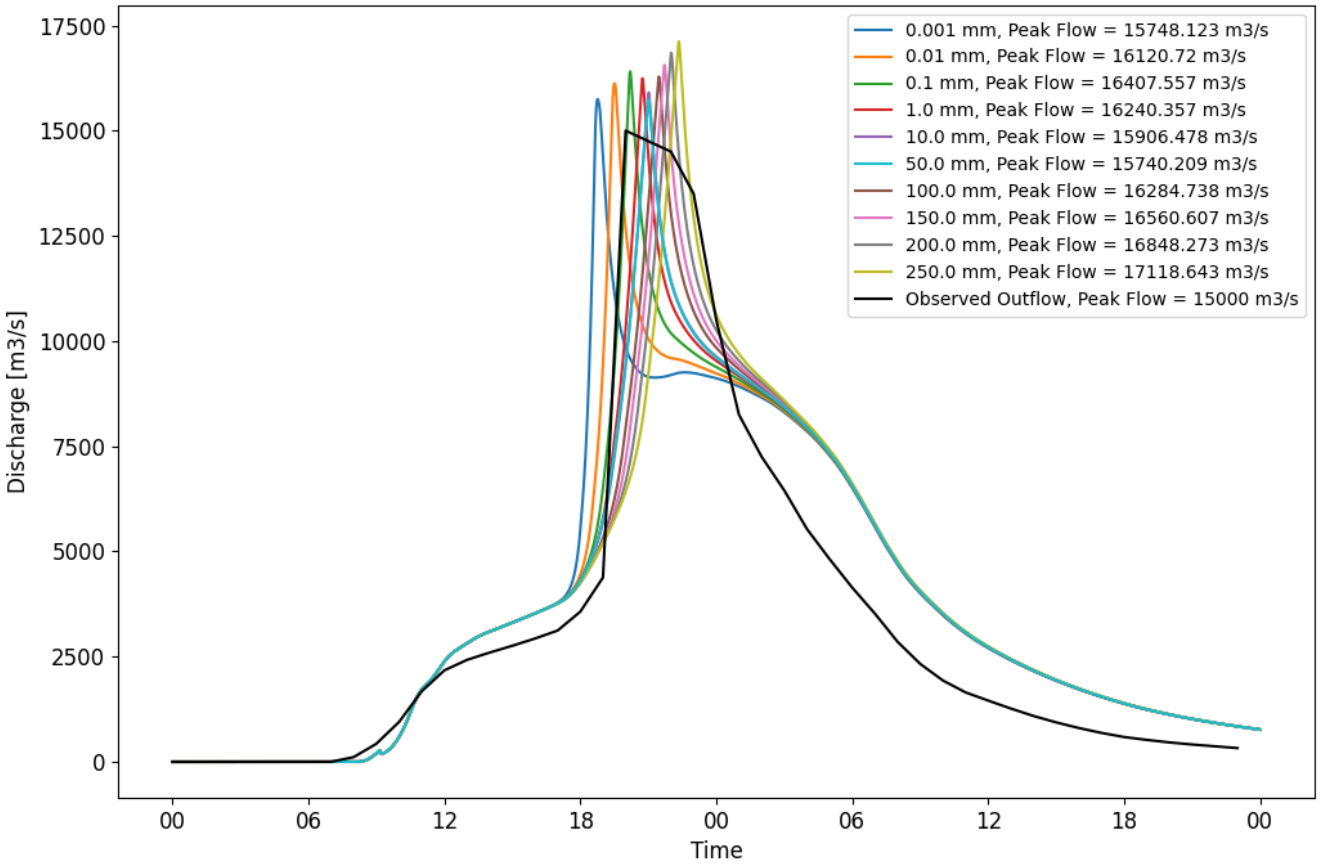
Dammhaveriparameter	**Enhet**	**Min**	**Max**	$\boldsymbol{\mu}$	$\boldsymbol{\sigma}$
Maxflöde	m^3/s	12366,3	17510,1	13751,3	818,3
Magasinnivå	möh	96,1	98,8	98,7	0,3
Bräschdjup	m	35,3	38,4	38,2	0,6
Bräschbredd	m	32,9	150	45,6	31,3

Tabell 20: Resultatfördelningar av slutliga uppnådda dammhaveriparametrar från 100 stokastiska beräkningar med sedimenttransportekvation Yang (1979) i Embrea, där Mannings n och d_{50} varierades slumpmässigt enligt *triangulära* fördelningar.

Dammhaveriparameter	**Enhet**	**Min**	**Max**	$\boldsymbol{\mu}$	$\boldsymbol{\sigma}$
Maxflöde	m^3/s	12167,6	15386,3	13709,4	565,9
Magasinnivå	möh	97,03	98,8	98,6	0,2
Bräschdjup	m	35,2	38,4	38,1	0,8
Bräschbredd	m	32,7	150	44,8	31,0

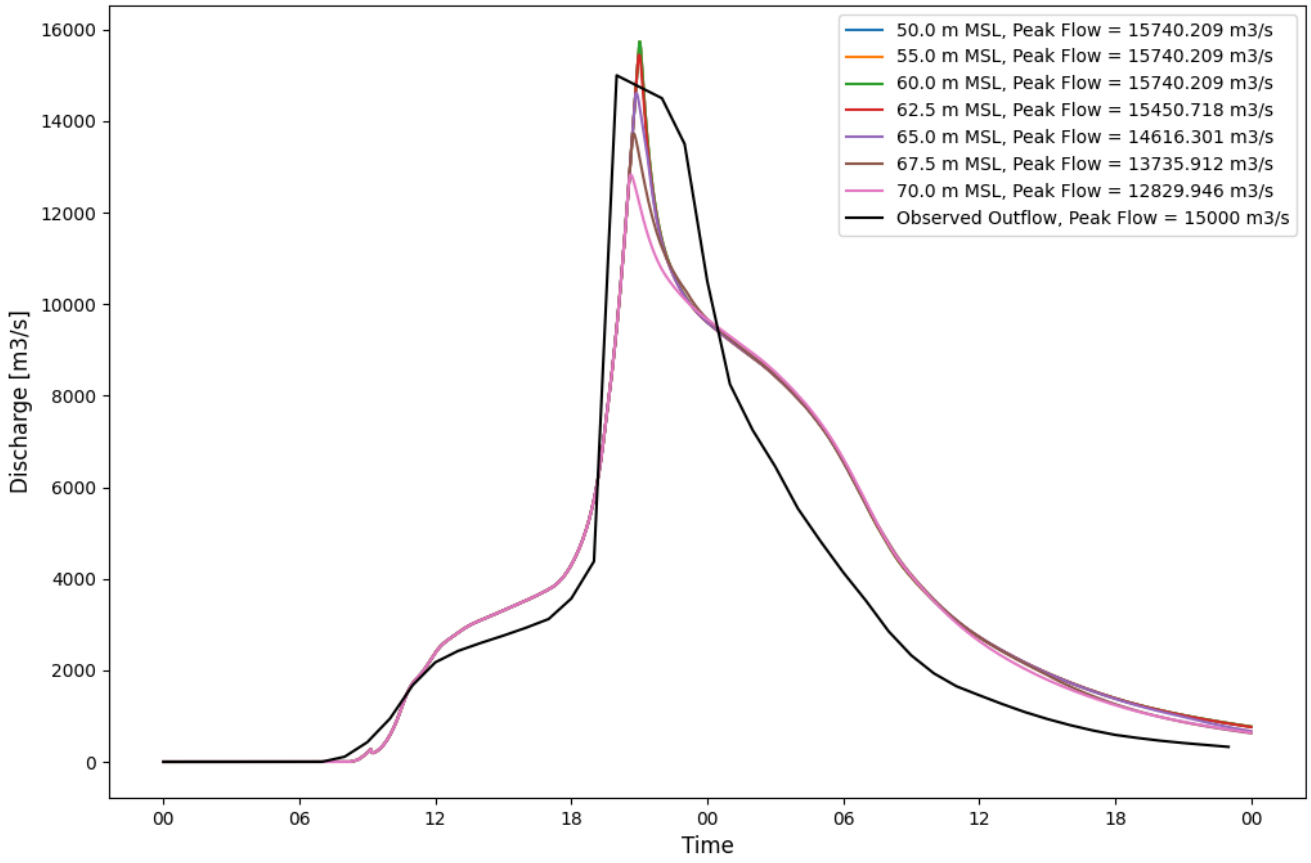
Utifrån denna statistik konstateras att beräkningarna i Embrea, oberoende val av sannolikhetsfördelning, resulterar i liknande intervall. Maxflödena är förhållandevis samlat kring ett medelvärde på 13700 m^3/s med en standardavvikelse omkring 700 m^3/s. Detta maxflöde noteras skilja sig från resultat av de deterministiska beräkningarna där värdet på maxflödet beräknades till drygt 11800 m^3/s. Skillnaden tydliggör de begränsningar som finns med deterministiska metoder och tyder på tidigare nämnda osäkerheter som inte går att kvantifiera med dessa beräkningar. Den maximala magasinnivån och det slutliga bräschdjupet uppvisar väldigt små variationer mellan simuleringarna. Bräschbredden däremot observeras ha en större spridning, vilket indikerar en högre osäkerhet för denna parameter.

I det sista beräkningsprogrammet Mike+ var inte stokastiska beräkningar möjliga, utan istället genomfördes ett antal separata deterministiska beräkningar där de två parametrarna d_{50} och bottennivå varierades en i taget. Figur 20 visar resultatet av variationen i medelkorndiameter, d_{50}, där ett ökat värde från 0,1 mm till 50 mm leder till ett förväntat successivt minskat maxflöde. För både mindre och större partikelstorlekar ses dock en oförväntad ökning i utflödet. Vidare observeras kurvornas form variera med kornstorleken, där en större medelkornstorlek resulterar i en senare initiering av bräschutvecklingen och en flackare mage i utflödeshydrografen. Tidsmässigt ligger kurvan för d_{50} = 0,1 mm närmast den observerade kurvan, medan maxflödet bäst överensstämmer med beräkningen där d_{50} = 50 mm.



Figur 20: Utflödeshydrografer från flera dammhaveriberäkningar för Tousdammen med varierande medelkorndiameter d_{50}.

Den andra illustrationen för Mike+ redovisar i figur 21 resultatet av hur beräkningarna påverkades av variation i bräschens uppnådda bottennivå, medan övriga parametrar, inklusive sidolutningen, hölls konstanta. Resultaten visar att en högre bottennivå – motsvarande en grundare bräsch – konsekvent leder till ett lägre maxflöde. En viss förskjutning observeras även i tidpunkten för när maxflödet inträffar.



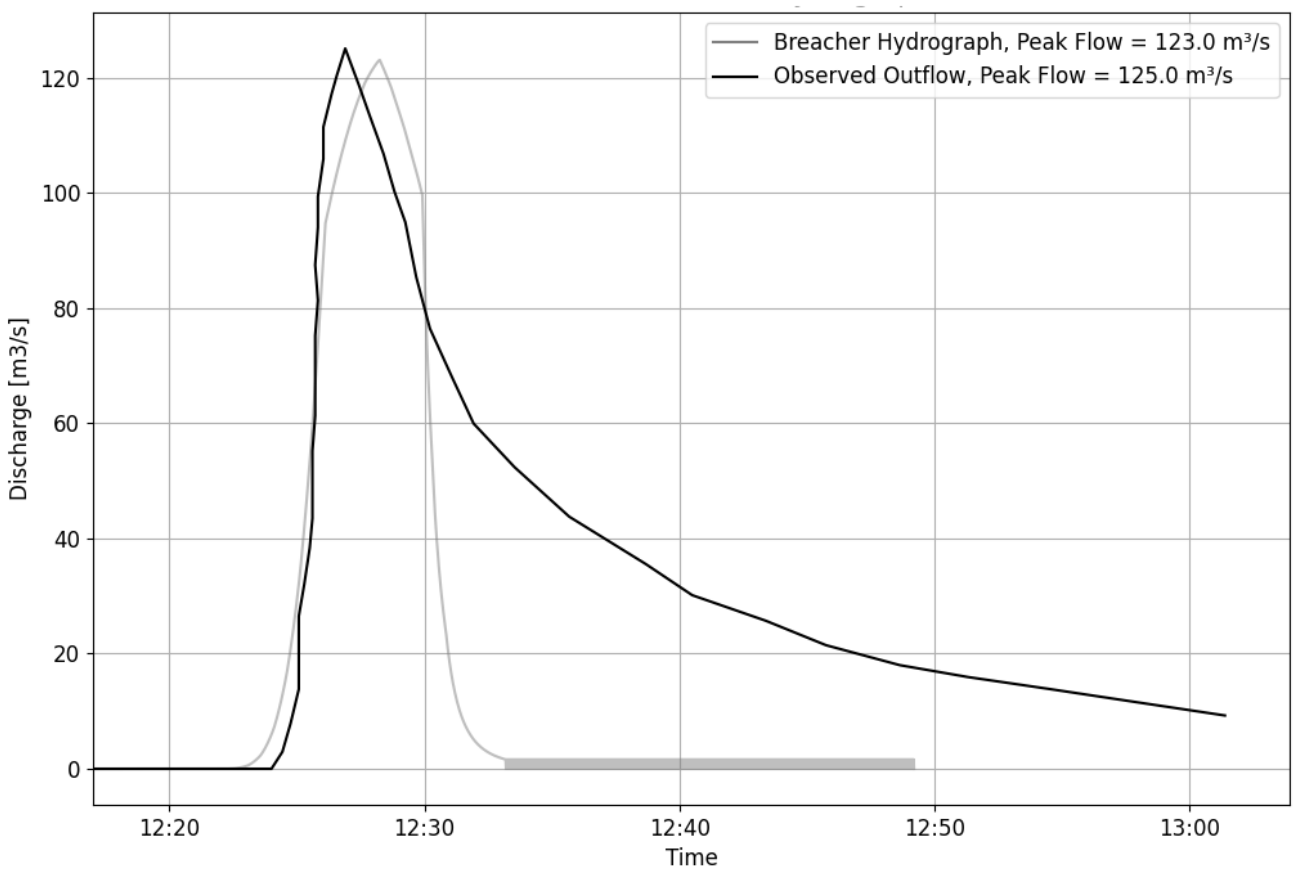
Figur 21: Utflödeshydrografer från flera dammhaveriberäkningar för Tousdammen där bräschens bottennivå varierar.

4.2 Fallstudie 2: Fälttest 2-2002

Fallstudie 2 omfattar analyser av fälttest 2–2002. Återigen inleds avsnittet med en redovisning av de deterministiska beräkningar som genomförts i respektive modellverktyg, följt av de stokastiska beräkningarna.

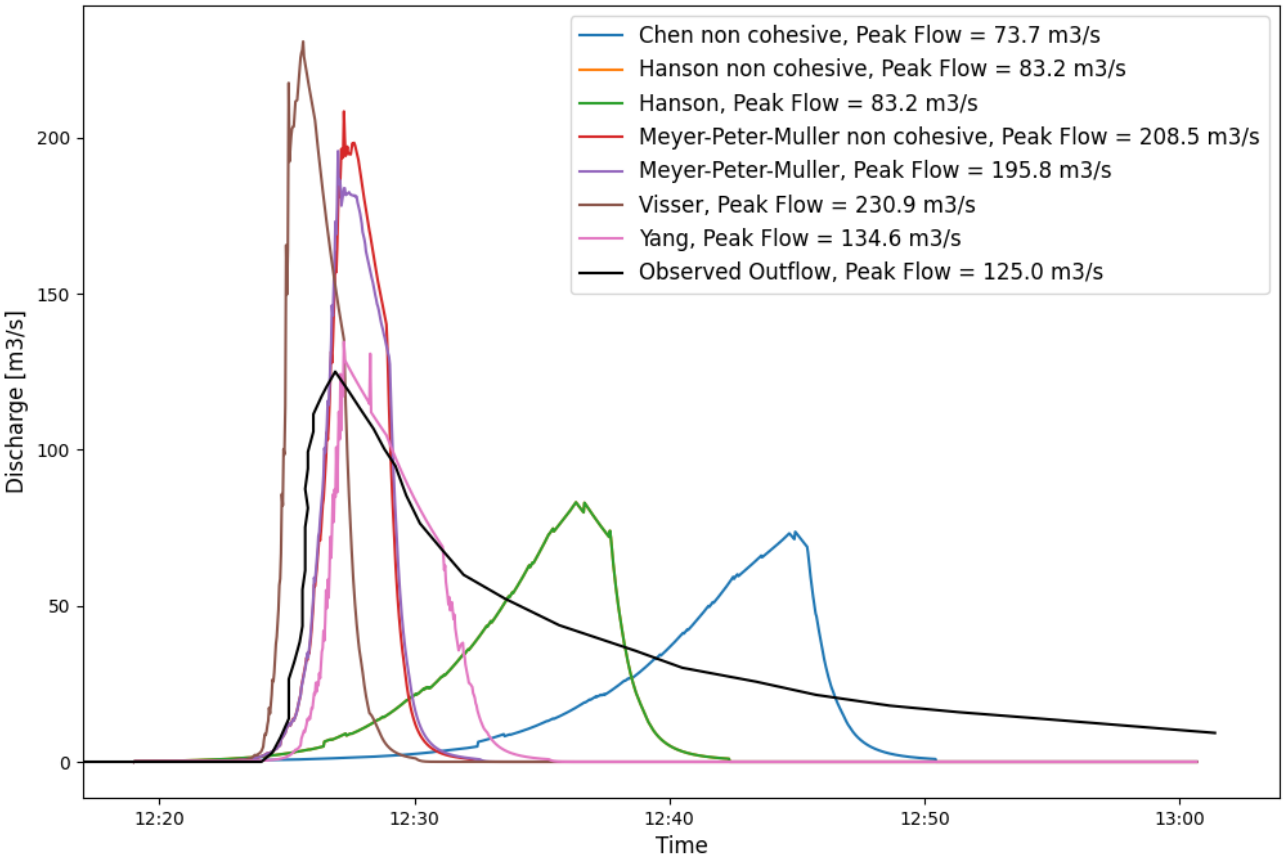
4.2.1 Deterministiska beräkningar

De deterministiska beräkningarna som genomfördes för fälttestdamm 2–2002 i Breacher resulterade i en utflödeshydrograf som väl stämmer överrens med den verkliga, observerade hydrografen. I figur 22 visas att det beräknade maxflödet är mycket nära det observerade värdet, och bredden på flödestopparna är likvärdiga mellan de två hydrograferna. Haveriförloppet initieras något senare i den beräknade hydrografen jämfört med den observerade, men det är försumbart. Den större avvikelsen som noteras är att det beräknade utflödet mer abrupt minskar till noll, medan det observerade flödet avtar mer gradvis.



Figur 22: Utflödeshydrograf från deterministiska dammhaveriberäkningar för fälttestdamm 2-2002 i Breacher, jämfört med den observerade utflödeshydrografen från det verkliga dammhaveriet.

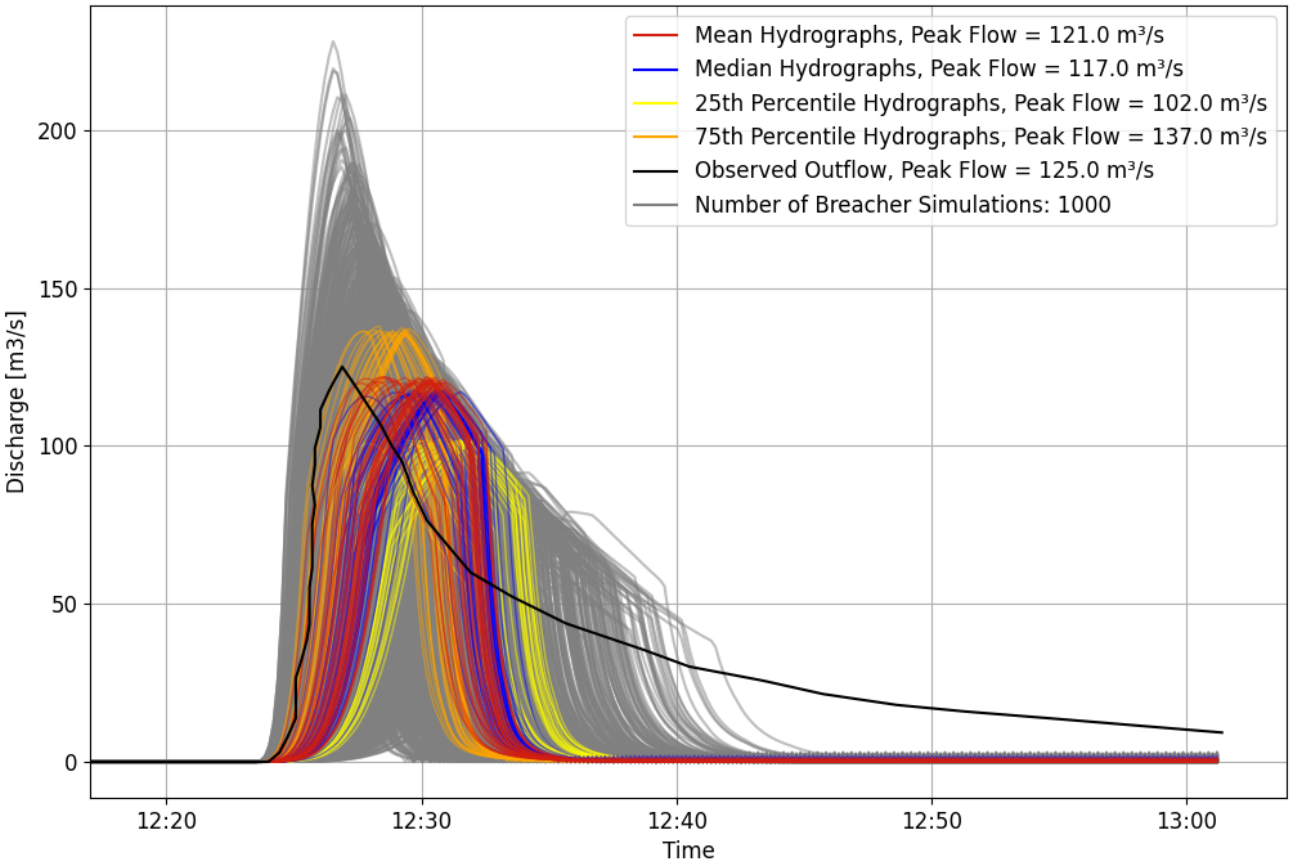
Motsvarande deterministiska beräkningar som genomfördes i Breacher utfördes även i Embrea, men här för varje tillgänglig sedimenttransportekvation. Resultaten i form av utflödeshydrografer från respektive beräkning presenteras i figur 23. Flera av beräkningarna resulterar i avsevärt högre maxflöden än det observerade förloppet, exempelvis överskattas maxflödet med 85 % vid användning av Visser (1998). Om beräkningarna istället baseras på Chen (1986) för friktionsjord eller Hanson (2004) för kohesionsjord resulterar beräkningarna däremot i lägre maxflöden än det observerade, där förstnämnda exempelvis underskattar maxflödet med 41 %. Dessa två modeller förskjuter dessutom tiden vid uppnådd peak, till skillnad från övriga beräkningar som bättre återger tidpunkten. Däremot noteras att kurvorna för Chen (1986) och Hanson (2004) har en mer realistisk form med bredare flödestoppar, till skillnad från de övriga modellerna som visar betydligt mer spetsiga maxflöden.



Figur 23: Utflödeshydrografer från deterministiska dammhaveriberäkningar för fälttestdamm 2-2002 i Embrea för alla möjliga sedimenttransportekvationer, jämfört med den observerade utflödeshydrografen från det verkliga haveriet.

4.2.2 Stokastiska beräkningar

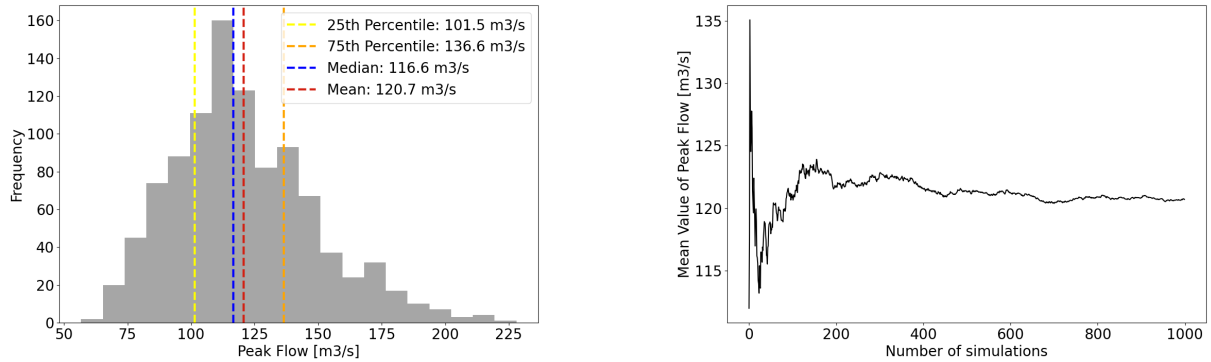
De stokastiska beräkningarna för fälttest 2-2002 i Breacher resulterade i 1000 utflödeshydrografer illustrerade i figur 24. Det observerade utflödet ligger nära medelvärdeshydrograferna, vilket indikerar att beräkningarna tenderar att uppskatta utflödeskurvan och maxflödet korrekt.



Figur 24: Utflödeshydrografer från stokastiska dammhaveriberäkningar för fälttestdamm 2-2002 i Breacher, jämfört med den observerade utflödeshydrografen från det verkliga dammhaveriet.

Spridningen i resultaten från de stokastiska beräkningarna illustreras vidare i figur 25a och 26. Histogrammet för maxflödet uppvisar en triangulär fördelning, där värdena är som mest frekventa kring medelvärdet, medan mer extrema maxflöden förekommer i betydligt lägre utsträckning. Detta framgår även av den 25:e och 75:e percentilen som båda ligger nära medelvärdet, vilket indikerar en viss robusthet i modellens resultat. I enlighet med tidigare resonemang ligger även medelvärdet för fördelningen förhållandevis nära det observerade peakvärdet och med en förhållandevis liten standardavvikelse (se tabell 21), vilket antyder att beräkningarna också utförts med god noggrannhet. Figur 25b visar vidare att medelvärdet av maxflödena konvergerar, vilket innebär att 1000 stokastiska beräkningar är tillräckliga för att uppnå konvergens.

Spridningsdiagrammet i figur 26 visar vidare ett tydligt samband mellan bottenbredd och maxflöde, samt utvecklingstid och maxflöde, där båda parametrars inverkan på det uppnådda flödet tydliggörs. Kombinationen av en bredare botten och kortare tidsutveckling observeras leda till högre flöden, medan en mindre botten under en längre utvecklingstid leder till mindre flöden. Färggradienten har en tydlig negativ lutning vilket indikerar inverkan av både bräschens slutliga bottenbredd och utvecklingstid.



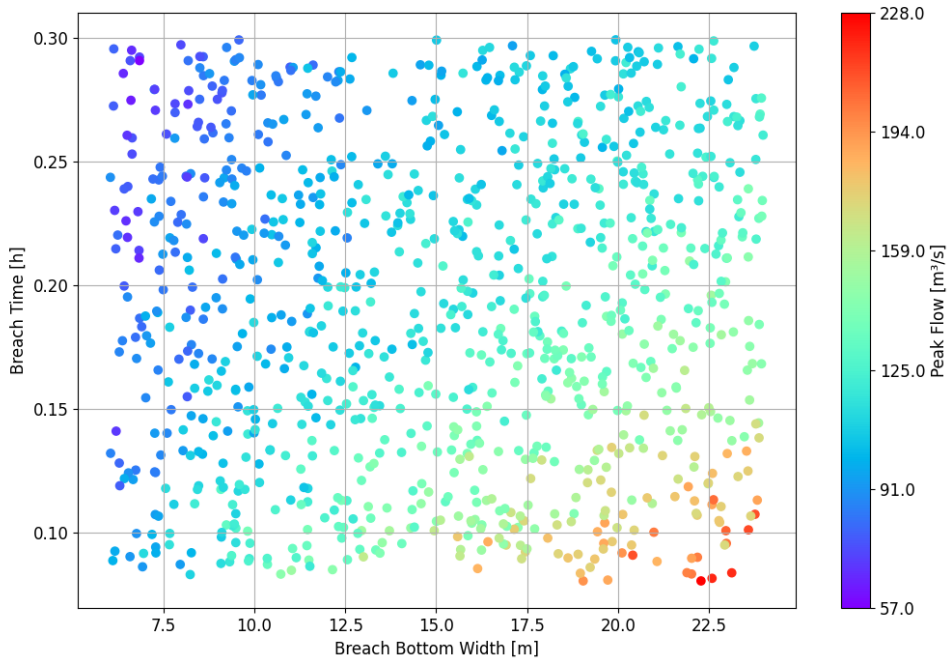
(a) Fördelningshistogram över uppnådda maxflöden från 1000 stokastiska beräkningar för fälttest 2-2002 i Breacher.

(b) Konvergensanalys av medelvärdet av fälttest 2-2002:s maxflöden i Breacher.

Figur 25: Resultat från 1000 stokastiska beräkningar för fälttestdamm 2-2002:s maxflöde i Breacher.

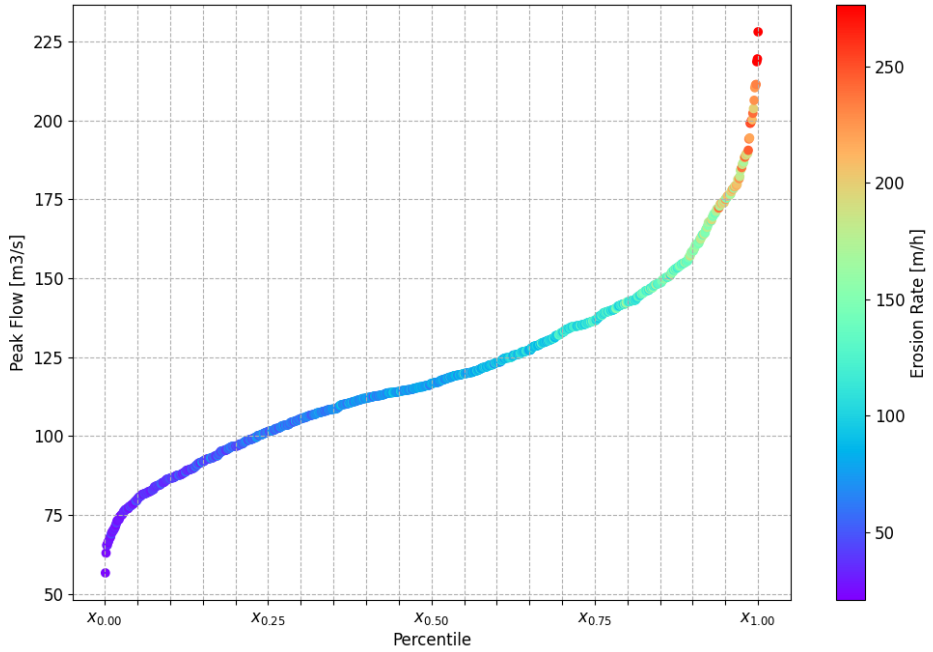
Tabell 21: Resultatfördelning av uppnått maxflöde för fälttestdamm 2-2002, från 1000 stokastiska beräkningar i Breacher där dammhaveriparametrar varierades slumpmässigt enligt *likformiga* fördelningar.

Dammhaveriparameter	**Enhet**	**Min**	**Max**	$\boldsymbol{\mu}$	$\boldsymbol{\sigma}$
Maxflöde	m^3/s	56,7	228,0	120,7	28,2



Figur 26: Spridningsdiagram över bräschens bottenbredd och utvecklingstid, färgkodat efter maxflöde, från 1000 stokastiska beräkningar för fälttest 2-2002 i Breacher.

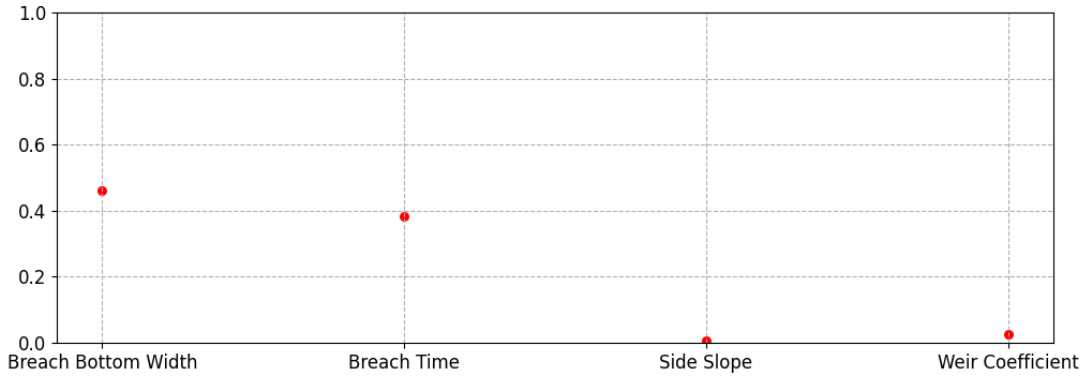
I percentilkurvan i figur 27 för de stokastiska beräkningars uppnådda maxflöden relateras beräkningarnas uppnådda maxflöden till olika sannolikheter. I figuren visas ett närmare linjärt samband mellan den övre och undre kvartilen vilket indikerar låga osäkerheter i modellutfallen för detta intervall. För mindre respektive större flöden syns en ökad känslighet för erosionshastigheten, där mindre förändringar av erosionshastighet leder till större förändringar av maxflöde. Färgskalan illustrerar tydligt att förlopp med höga erosionshastigheter, där bräschbredden är stor samt utvecklingstiden liten, sammanfaller med de största beräknade maxflödena, medan lägre erosionshastigheter, där bräschbredden är liten och utvecklingstiden längre, resulterar i lägre flöden. Dessutom visar färgskalan i figuren en kontinuerlig och gradvis övergång från de lägsta till de högsta erosionshastigheterna, vilket därtill indikerar det tydliga sambandet mellan både bräschens slutliga bottenbredd och dess utvecklingstid i relation till maxflödet för denna damm.



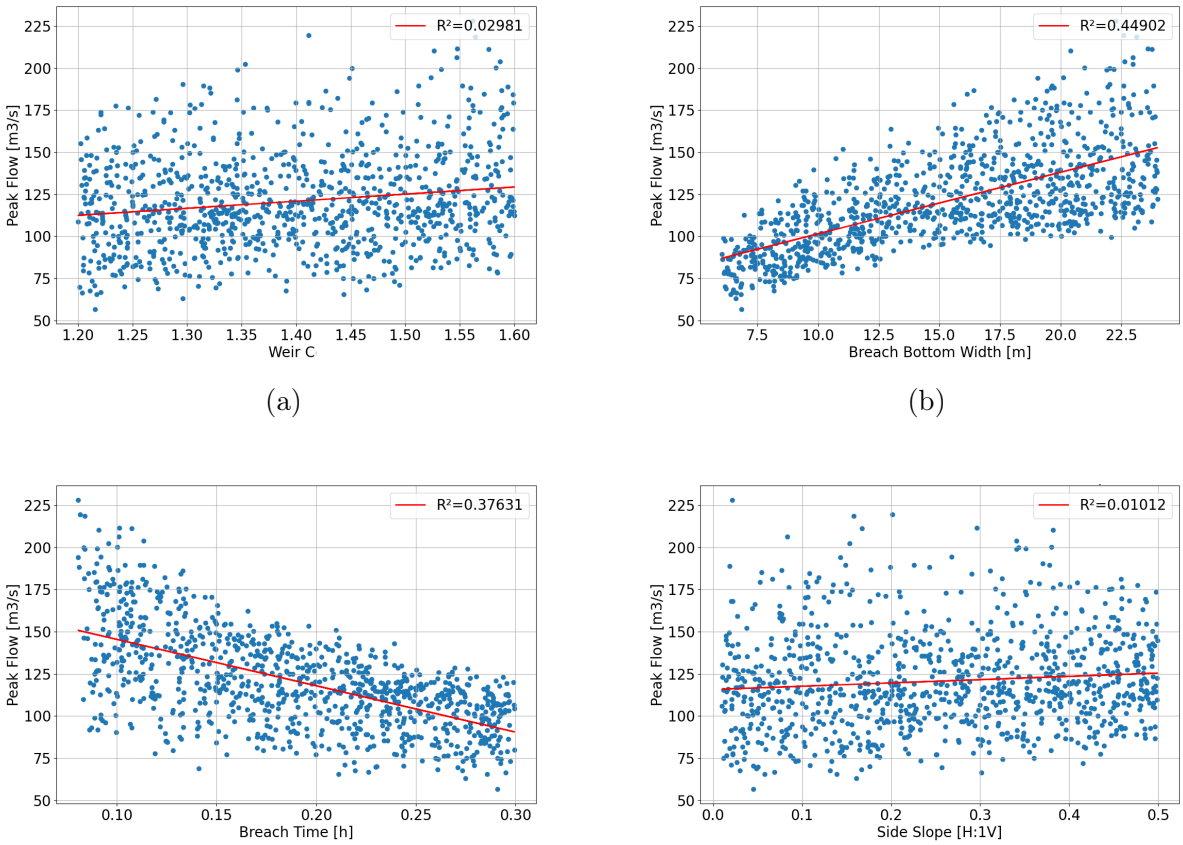
Figur 27: Percentilkurva för fälttest 2-2002:s maxflöde av 1000 stokastiska beräkningar i Breacher, färgkodad efter erosionshastighet.

Känslighetsanalysen för fälttest 2-2002 som belyser de ingående parametrarnas relativa inverkan på det beräknade maxflödet redovisas i figur 28 och 29. Figurerna bekräftar de kvantitativa tolkningarna i figur 26 och 27, det vill säga att både bräschens maximala bottenbredd samt utvecklingstid var parametrar med stor inverkan på resultatet. Första ordningens känslighetsindex för respektive parameter observeras vara 0,46 och 0,38 (figur 28). De separata spridningsdiagrammen i figur 29 mellan maxflödet och respektive parameter bekräftar detta då maxflödet har närmare linjära samband med bräschens bottenbredd samt utvecklingstid, med högre värden på regressionslinjernas R^2-koefficienter. De andra parametrarna, det vill säga bräschens sidolutning och överfallskoefficienten, visar svagare korrelation med maxflödet. Dessa parametrar kan därmed konstateras ha en begränsad inverkan på maxflödet. Regressionslinjerna belyser även vilka samband som råder mellan respektive parameter och maxflödet. Utöver de två parametrar som tidigare belystes i fallstudie 1, visar både figur 29a och figur 29d att ett ökat värde på överfallskoefficient respektive bräschens sidolutning leder till ett ökat flöde. En högre

överfallskoefficient innebär att vattnet mer effektivt strömmar över dammkrönet och ett större flöde. En större sidolutning av bräschen medför en större öppning givet att övriga parametrar är konstanta, vilket också möjliggör ett större flöde.



Figur 28: Första ordningens känslighetsindex för parametrar i de stokastiska dammhaveribe-räkningarna för fälttest 2-2002, där varje parameters relativa bidrag till variationen i maxflödet visas.



Figur 29: Spridningsdiagram över maxflöde och a) överfallskoefficient C, b) bräschens slutliga bottenbredd, c) bräschens utvecklingstid och d) bräschens sidolutning, med presenterad linjär regressionslinje och angivet R^2-värde.

De stokastiska beräkningarna i Embrea för fälttest 2-2002 resulterade i parameterfördelningarna presenterade i tabell 22 och 23. Resultaten uppvisar likvärda mönster oberoende av om en likformig eller triangulär sannolikhetsfördelning användes. Det genomsnittliga maxflödet från de 1000 stokastiska simuleringarna tenderar att överskatta det observerade maxflödet med över 100 %. Variationen i tidpunkten för när maxflödet inträffar noteras likväl som för Tousdammen vara stor, medan variationen för den maximala magasinnivån och bräschdjup är mycket mindre med en liten standardavvikelse. Bräschbredd uppvisar en något större spridning.

Tabell 22: Resultatfördelningar av slutliga uppnådda dammhaveriparamtetrar från 1000 stokastiska beräkningar i Embrea, där Mannings n och d_{50} varierades slumpmässigt enligt *likformiga* fördelningar.

Dammhaveriparameter	**Enhet**	**Min**	**Max**	$\boldsymbol{\mu}$	$\boldsymbol{\sigma}$
Maxflöde	m^3/s	73,8	434,0	258,7	57,6
Magasinnivå	möh	368,0	369,8	368,9	0,24
Bräschdjup	m	1,7	4,9	4,87	0,26
Bräschbredd	m	8,4	39	23,1	5,9

Tabell 23: Resultatfördelningar av slutliga uppnådda dammhaveriparamtetrar från 1000 stokastiska beräkningar i Embrea, där Mannings n och d_{50} varierades slumpmässigt enligt *triangulära* fördelningar.

Dammhaveriparameter	**Enhet**	**Min**	**Max**	$\boldsymbol{\mu}$	$\boldsymbol{\sigma}$
Maxflöde	m^3/s	73,8	434,0	254,0	45,6
Magasinnivå	möh	368,2	369,8	368,9	0,2
Bräschdjup	m	1,7	4,9	4,85	0,36
Bräschbredd	m	8,4	39	22,4	4,4

5 Diskussion

5.1 Fallstudie 1: Tousdammen

De inledande deterministiska beräkningarna för Tousdammen som genomfördes i syfte att med högsta möjliga precision återskapa bräschförloppet och efterlikna den faktiska utvecklingen av dammhaveriet, resulterade generellt i goda överensstämmelser. För samtliga programvaror – Breacher, Embrea och Mike+ – liknar både formen på den beräknade utflödeshydrografen och dammhaveriparametrarna någorlunda de angivna enligt data och litteratur från Alcrudo & Mulet (2007). Utöver validering mot den observerade utflödeshydrografen jämfördes resultaten även med tidigare beräkningar för dammen inom IMPACT-projektet, presenterade i figur 8, vilket ytterligare stärker tillförlitligheten i modellresultaten då liknande utfall erhölls för dessa. Även spridningen i resultaten från de olika organisationerna inom IMPACT bedöms vara inom samma storleksordning, vilket tyder på att osäkerhetsnivån i de genomförda beräkningarna är rimlig och i linje med tidigare studier.

Den största avvikelsen i beräkningsresultaten noteras vid jämförelse med utflödeshydrografen för det så kallade observerade utfallet. De beräknade flödestopparna i samtliga programvaror är mer spetsiga och maxflödet upprätthålls under en kortare tidsperiod. Kurvornas form uppvisar därtill en sekundär ökning i utflödet, liknande en "mage", vilket avviker från formen på Tousdammens observerade utflödeshydrograf. Denna sekundära ökning kan förklaras av inflödet till dammen. Den observerade inflödeskurvan till Tousdammen och som nyttjades i beräkningarna uppnår nämligen sitt maximala värde omkring 22:00 (se appendix 31b), vilket återspeglas i det totala utflödet vid tidpunkten som en sekundär flödestopp även efter att haveriet har initierats. Den observerade utflödeshydrografen som de beräknade hydrograferna jämförs mot i samtliga resultatfigurer uppvisar dock inte denna sekundära ökning; utflödestoppen är istället bredare och jämnare vilket framstår som anmärkningsvärt. Det är därmed nödvändigt att reflektera över att den så kallade observerade kurvan egentligen inte representerar ett verkligt observerat facit, utan också är en rekonstruktion över förloppet framtagen av den spanska myndigheten CEDEX baserat på tillgängliga observationer. Detta innebär att även den innehåller osäkerheter och bör tolkas som en kvalitativ uppskattning snarare än en exakt återgivning av verkligt förlopp.

En lång och jämn flödestopp som den i den observerade kurvan kräver vidare att produkten $BH^{1.5}$, som bestämmer utflödet enligt överfallsekvationen (12), hålls relativt konstant över tid (förutsatt att överfallskoefficienten C i ekvationen antas vara konstant). Eftersom modellen visar att bräschen öppnas snabbt och magasinnivån samtidigt sjunker kraftigt efter haveriet initierats, är det osannolikt att ett konstant utflöde skulle kunna upprätthållas under längre tid. Detta talar snarare för att flödet snabbt bör minska efter uppnådd topp, vilket också syns i modellresultaten. Därmed stöds även modellernas spetsigare flödestoppar av de fysikaliska förutsättningarna i scenariot. Mot bakgrund av detta, samt det faktum att samtliga beräknade kurvor i detta arbete stämmer väl överens med tidigare beräkningar i IMPACT-projektets resultat, kan det argumenteras för att modellernas representation av utflödet i vissa avseenden bedöms kunna vara rimligare än den observerade kurvan.

Vidare observerades en avvikelse i boxmodellernas beräkningar i form av en för tidig initiering av dammhaveriet. I Breacher, som är en parametrisk boxmodell, styrs initieringen av dammhaveriet av ett användarspecificerat kriterium. Denna typ av tröskelbaserad triggning gör modellen enkel att tillämpa men innebär också en metodologisk osäkerhet där resultatet blir känsligt för exakt när nivån uppnås i beräkningen, vilket därmed kan tänkas vara orsaken till den för tidiga initieringen av haveriet. De fysiskt baserade initieringarna i Embrea och Mike+ innebär att haveriet beräknas utifrån interna processer i dammkroppen, såsom sedimenttransport och

erosion, snarare än att styras av externa gränsvärden. Detta ger möjlighet till en mer dynamisk och realistisk representation av förloppet, men innebär också att resultaten är känsliga för antaganden kring materialsammansättning och eroderbarhet i dammen. Dessa parametrar är svåra att fastställa exakt, vilket innebär att osäkerheten i modellen i viss mån ökar, även om metoden i grunden är mer fysikaliskt representativ. Beräkningarna i Mike+ däremot, som också var fysikaliskt baserade, noteras lyckas bättre med att reproducera haveriförloppet.

Tousdammens utformning påverkar också vilken typ av modell och vilka parametrar som är mest relevanta att beakta. Dess stora magasinvolym, långa krönprofil och zonindelade dammstruktur, i kombination med den goda tillgången till dokumentation och data, kan tala för den parametriska modellen Breacher då osäkerhetena för att uppskatta parametrarna är mindre. Breacher är enkel att sätta upp, snabb att köra och kan med rätt kalibrering ge resultat som ligger nära det observerade förloppet. Embrea däremot kräver en mer omfattande modelluppsättning och längre beräkningstid ju större damm och tidsförlopp som ska simuleras, vilket medförde att ett större tidssteg behövde användas i beräkningarna och att resultaten därmed innehöll mer numeriskt brus. Den goda tillgången till data, inklusive materialparametrar, skulle däremot också kunna tala för att den fysikaliskt baserade modellen Embrea egentligen kan betraktas som mer tillförlitlig. Detta eftersom att modellen beräknar erosion med hjälp av sedimenttransportekvationer vilket ger en mer fysikaliskt baserad beskrivning av bräschens utveckling. De stokastiska beräkningarna i Embrea resulterade i ett genomsnittligt beräknat maxflöde på cirka 13 700 m^3/s, vilket kan jämföras med det observerade maxflödet på 15 000 m^3/s. Resultaten uppvisade dessutom en mycket begränsad spridning med en standardavvikelse på cirka 700 m^3/s. Detta skiljer sig från beräkningarna med Breacher där det genomsnittliga maxflödet uppgick till drygt 18 200 m^3/s och där spridningen var betydligt större, med en standardavvikelse omkring 7 700 m^3/s. Embrea uppvisar även god överensstämmelse för övriga parametrar. Nedanstående jämförelse visar medelvärden från de stokastiska beräkningarna i förhållande till observerade data:

- Magasinnivå: 98,7 möh (beräknat) vs. 99,5 möh (observerat).
- Bräschdjup: 38,2 m vs. 38,5 m.
- Bräschbredd: 45 m vs. 40 m.

Samtliga av dessa parametrar uppvisade dessutom små standardavvikelser, vilket ger en känsla av hög precision i beräkningarna. Drygt 68% av resultatens maxflöden observeras till exempel ligga mellan 13100 m^3/s - 14300 m^3/s (oberoende valet av sannolikhetsfördelning) vilket innebär en liten spridning med endast 4% från medelvärdet. Detta är dock ett mycket snävt intervall i jämförelse till de konstaterade osäkerheterna omkring ± 30% som observerades i IMPACT-resultatet. Det finns därför en risk att Embrea ger en missvisande bild av robusthet, där den begränsade spridningen snarare kan bero på att sedimenttransportekvationerna inte fångar hela osäkerhetsspektrumet eller att antalet stokastiskt varierade parametrar i beräkningarna var för få. Detta skulle också kunna vara en möjlig förklaring till att valet av fördelningstyp inte hade en större inverkan på resultatet.

Vad beträffar de stokastiska dammhaveriberäkningarna för Tousdammen i Breacher konstateras ytterligare många utfall vara orealistiska. Detta kan förklaras av att dammhaveriparametrarna slumpmässigt samplades oberoende av varandra trots att flera av dem i verkligheten uppvisar inbördes korrelation. Bräschens bottenbredd och utvecklingstid är två parametrar som i verkligheten inte kan betraktas som oberoende, en bredare bräschbotten kräver längre tid att utvecklas. Den stokastiska samplingens möjlighet att kombinera stor bräschbredd med kort utvecklingstid leder till fysiskt osannolika scenarier motsvarande de högsta flödestopparna. Med liknande resonemang kan den längsta utvecklingstiden kombineras med den minsta bottenbred-

den, vilket resulterar i onormalt låga flöden. Dessa stokastiska kombinationer förekommer inte i verkliga förlopp och bidrar till att snedvrida den statistiska fördelningen. För att hantera denna begränsning i metoden är det därför rimligt att använda percentiler vid flödesbedömningen. Genom att exempelvis utgå från resultaten motsvarande rimliga erosionshastigheter i figur 17, det vill säga fram till den 90:e percentilen, utesluts de mest osannolika resultaten vilket kan ge en mer realistisk uppskattning av variationen i maxflöde. Vidare kan 50 % av de stokastiska resultaten observeras ligga mellan den nedre och övre kvartilen motsvarande maxflödena 12200 m^3/s - 22900 m^3/s , vilket innebar en spridning på 30% från medianvärdet 17300 m^3/s till dessa kvartiler. Uttryckt med intervall av 1 standardavvikelse från medelvärdet, $\mu \pm \sigma$, kan därutöver ungefär 68 % konstateras ligga inom intervallet 10600 m^3/s - 25900 m^3/s, med en spridning på drygt 40 % från medelvärdet. Spridningen i resultatet konstateras därför vara i linje med de tidigare genomförda beräkningarna i IMPACT.

En annan orealistisk trend vilken visades i de deterministiska, motsvarande stokastiska, beräkningarna i Mike+ var där medelkorndiametern (d_{50}) varierades i figur 20. Inom intervallet 0,1–50 mm visade trenden det förväntade, det vill säga ett lägre maxflöde för större partikelstorlek. För grövre fraktioner än så blev resultaten orimliga då maxflödet ökar för en ökad korndiameter. Denna märkliga trend är dock förklarlig med tanke på att sedimenttransportekvationerna inte är anpassade för så stora partikelstorlekar. Däremot är det anmärkningsvärt att den förväntade trenden inte framkom för $d_{50} < 0{,}1$ mm. Därför analyserades utflödeshydrografen vidare i en alternativ punkt längs det modellerade vattendraget, belägen precis vid dammstrukturen där endast flödet genom bräschen beaktas. I denna punkt kunde den förväntade trenden tydligt urskiljas även för de finare fraktionerna vilket tyder på att val av analysplats för utflödeshydrograferna är avgörande. I det presenterade resultatet från beräkningarna i Mike+ användes en punkt nedströms dammen där flöden från både bräsch och utskov summerades simultant. Detta samspel mellan två snabbt varierande flöden försvårar tolkningen av resultaten, eftersom att det till viss del döljer effekten av d_{50} på det utflöde som enbart passerar genom bräschen.

5.2 Fallstudie 2: Fälttest 2-2002

Resultaten av arbetets dammhaveriberäkningar för den homogena grusdammen i Norge visade generellt goda överensstämmande resultat med observerade data för det uppmätta flödet av fälttestet. Formen på hydrografen med uppnått maxflöde och bredare flödestopp beräknas mycket likt i Breacher, dock har den observerade hydrografen en väsentligt större volym än den beräknade. Detta tyder på att det finns osäkerheter i inflödeshydrografen och/eller magasinkurvan för detta fälttest. I Embrea skiljer sig resultaten mer från den observerade hydrografen, och uppvisar även betydande variation beroende på vilken sedimenttransportekvation som tillämpats. De stora skillnaderna i uppnått maxflöde tyder på betydande metodosäkerheter i dessa modeller. För mindre dammar såsom i fälttest 2–2002 där uppströms geometri och bottenfriktion får större relativ betydelse blir valet av modellverktyg också viktigare. I sådana fall skulle mer fysikaliskt baserade modeller som Embrea vara motiverade då de förväntas ha potential att fånga komplexa processer för dammen och innefatta mindre osäkerheter. Samtidigt visar arbetets resultat att osäkerheterna för dessa modeller fortfarande är stora och i hög grad påverkas av valet av sedimenttransportekvation vilket ändå kan ge stöd för den parametriska modellen Breacher.

Utöver modellvalet och dess påverkan spelar även valet av indata och specifika dammhaveriparametrar en avgörande roll för resultatet av beräkningarna. För fälttestdammen identifierades bräschens utvecklingstid, utöver den slutliga bräschbredden, som en särskilt känslig parameter med tydlig påverkan på det uppnådda maxflödet. Detta beror troligen på fälttestdammens mindre magasinvolym, se mer i avsnitt 5.3. Att dammar med liten magasinvolym är särskilt

känsliga för bräschens utvecklingstid kan till viss del förklara den överskattning av maxflöde som observerats i de stokastiska beräkningarna med Embrea. Medelvärdet av 1000 beräkningar resulterade i ett värde runt 250 m^3/s (figur 22 och 23), vilket är dubbelt så högt som det uppmätta flödet på 125 m^3/s. Embrea bygger på fysiskt baserade erosionsmodeller där bräschens utveckling styrs av vald sedimenttransportekvation. Om modellen beräknar en snabb erosionstakt kan bräschen nå sin maximala bredd på kort tid, vilket i en damm med begränsad magasinvolym leder till att en stor andel av vattnet töms mycket snabbt. Detta resulterar i ett abrupt flödesförlopp och ett överskattat maxflöde. En ytterligare förklaring till det överskattade maxflödet är intervallet för Mannings n i de stokastiska beräkningarna, som endast tillåter antagande av högre värden jämfört med för den deterministiska beräkningen. Ett högre värde på friktionskoefficienten leder till en ökad bottenskjuvspänning, vilket i sin tur påskyndar erosionen och resulterar i ett större utflöde genom bräschen.

En annan anmärkningsvärd observation är att för flera av de valda sedimenttransportekvationerna i Embrea visade resultatet liksom i Breacher att utflödet sjönk abrupt till noll efter det uppnådda maxflödet. Detta skiljer sig från det observerade förloppet i verkligheten där flödet avtog successivt. Enligt överfallsekvationen måste magasinnivån vara den avgörande orsaken till flödesförändringen efter uppnått peakvärde i utflödeshydrografen, eftersom att bräschens botten inte minskar i bredd igen och då överfallskoefficienten är konstant. Det successivt avtagande flödet i verkligheten kan därför förklaras av att magasinnivån förblev hög under en längre tid till följd av att utflödet nedströms begränsades av en förhöjd vattennivå nedströms orsakad av den redan genomflödade vattenvolymen. Detta hydrauliska motstånd fångas inte upp i beräkningarna vilket medför att flödet sjunker för snabbt.

De stokastiska beräkningarna i Embrea där slumpmässigt valda indata fördelades enligt både likformiga och triangulära fördelningar visade att valet av fördelningstyp inte hade någon väsentlig påverkan på resultaten. Dock bör det noteras att endast två parametrar, Mannings n och d_{50}, varierades i dessa beräkningar. En vidare undersökning där fler indata-parametrar tillåts variera inom sannolikhetsintervall hade varit önskvärd för att säkerställa resultaten, att detta inte genomfördes berodde på avsaknaden av stokastiska effekter vid tidigare försök att inkludera variation i ytterligare parametrar. Detta är dock anmärkningsvärt, särskilt med hänsyn till att flera av dessa parametrar enligt tabell 5 har betydande påverkan på de sedimenttransportekvationer som används i modellen.

5.3 Känslighetsanalys

Båda fallstudierna i arbetet bekräftarna att dammhaveriberäkningar innefattar flera osäkerhetsfaktorer, och vissa parametrar visar sig vara särskilt känsliga. I fallstudie 1 för Tousdammen visades den största osäkerheten i resultaten ligga i den maximalt uppnådda bräschbredden, vilket också var den dammhaveriparameter som visades ha störst påverkan på maxflödet. Korndiameterns medelstorlek, bräschens sidolutning och bottennivå visades vid variation i Mike+ inte leda till större inverkan, likaså vad gäller bräschens utvecklingstid eller överfallskoefficienten från resultatet i Breacher. Att bräschbredden är en så pass känslig parameter var väntat med tanke på dess direkta påverkan i flödesberäkningarna enligt överfallsekvationen, som beskriver flödet över dammkrönet vid varje tidpunkt baserat på bräschbredden, magasinnivån samt överfallskoefficienten. Därför förväntades även överfallskoefficientens värde ha en tydlig inverkan på uppnått maxflöde, vilket dock inte observerades i känslighetsanalysen. I de stokastiska beräkningarna varierades denna inom ett intervall som generellt kan anses lågt för konventionella dammar, men för Tousdammen och dess långa krönprofil är de möjliga värdena representativa. Parameterns låga känslighet var därför inte förväntad.

I fallstudie 2 för fälttestdammen visades även utvecklingstiden för bräschen vara en känslig

parameter utöver den slutligt uppnådda bräschbredden. En möjlig förklaring till denna skillnad mellan de två fallstudierna kan vara skillnaden i dammarnas magasinvolym. Utflödet är beroende av dammens magasinnivå, och i en damm med liten magasinvolym ändras magasinnivån snabbare vid dammhaveri och ett snabbt utflöde från dammen. I en damm med ett större magasin sjunker nivån mycket långsammare. Det är därför rimligt att beräkningarna för en damm med litet magasin och snabb bräschutveckling generar en spetsigare utflödeshydrograf med högre uppnått maxflöde då en stor andel av magasinet hinner tömmas under tidiga skeden av förloppet. Utvecklingstiden får därför större genomslag på resultatet. För dammar med större tillgänglig magasinvolym uppströms är däremot bräschens utvecklingstid mindre avgörande och det är i högre grad bredden som avgör kapaciteten för utflödet. Bräschbredden är således en mer dominerande parameter i dammar med större magasin, medan dammar med mindre magasin är känsliga för både bredd och tid.

5.4 Sammanfattande diskussion

De möjliga sannolikhetsbaserade metoderna i programvarorna Breacher och Embrea erbjuder ett komplement till traditionella dammhaveriberäkningar i form av att producera sannolikhetsfördelade utflödeshydrografer för dammbräschen där osäkra och och känsliga parametrar kvantifieras. De inledande deterministiska beräkningarna visade att båda programvarorna, givet kända parametrar, kunde återskapa utflödeshydrografer som liknande de verkliga förloppen för fallstudierna samt låg inom samma osäkerhetsintervall som tidigare resultat. Det är värt att notera detta, att även för dessa deterministiska beräkningar finns osäkerheter i resultaten vilket understryker att detta är en oundviklig del av dammhaveriberäkningar. Att osäkerhetsintervallen är rimliga är dock ett gott tecken på att programverktygen utgör en trovärdig grund som beräkningsmodeller. För att integrera osäkerheterna i resultatredovisningen av beräkningarna och uppnå syftet med examensarbetet simulerades därför ett stort antal scenarier baserade på stokastiskt slumpade indata, illustrerande medelvärden och spridningsmått för genererade utflödeshydrografer samt för kritiska resultatparametrar såsom maxflöde. Resultaten från de två fallstudierna visade hur denna typ av analys ger ett mer mångsidigt beslutsunderlag.

En stor potential hos dessa metoder är hur de kan användas i kommunikation mellan olika parter vad gäller dammhaveriberäkningar. Att presentera intervall av möjliga utflöden snarare än ett enskilt värde ger inte bara en mer realistisk bild av osäkerheterna, utan kan också öka tilliten till analysen genom att bygga på statistiska resonemang snarare än fasta antaganden. Den färgkodade percentilkurvan som kan illustreras från resultatet i Breacher möjliggör till exempel att kunna koppla ett visst flöde till en viss sannolikhet, samt en redovisning av spridningen i resultatet där osäkerheterna tydliggörs och kan kvantifieras för specifika scenarier. Utöver att analysera osäkerheter möjliggör de sannolikhetsbaserade beräkningarna även känslighetsanalyser, där parametrarnas relativa inverkan på resultaten kan identifieras. I båda fallstudierna framstod bräschbredden som den mest inflytelserika parametern för maxflödet, men särskilt stor var påverkan i Tousdammen. I fälttestdammen observerades däremot en ökad känslighet för bräschens utvecklingstid vilket sannolikt kan kopplas till den mindre magasinvolymen.

Trots potentialen med sannolikhetsbaserade metoder kräver dessa viss försiktighet och medvetenhet. En central insikt från detta arbete är att även stokastiska resultat, trots sin kvantitativa karaktär, fortfarande är starkt beroende av valda antaganden om indata. Valet av intervall som parametrar tillåts variera inom påverkar i hög grad fördelningen av möjliga resultat. Däremot observerades i Embrea att valet av vilken typ av sannolikhetsfördelning vilken dammhaveriparametrarna tilläts variera inom inte var lika avgörande. Ett begränsat val av fördelningsfunktion ska därför inte ses som en begränsning för att tillämpa metoden av dessa beräkningar. Det är dock viktigt att tolka resultaten med viss försiktighet eftersom att vissa brister observerades i

modellens hantering av stokastiska beräkningar för dammar med mindre magasinvolymer. De genererade resultatfördelningarna uppvisade exempelvis ibland orimliga egenskaper, som att det största eller minsta utfallet låg inom medelvärdet ± en standardavvikelse.

Det praktiska genomförandet av sannolikhetsbaserade metoder visade därmed på vissa begränsningar. De nyttjade programvarorna som stödjer dessa observades variera stort i användarvänlighet och pålitlighet. Breacher erbjöd ett mindre omfattande utbud i form av möjliga inställningar och variationer, men fungerade stabilt med tydlig dokumentation, god transparens och andvändarvänlighet. Programvaran möjliggjorde därutöver visualisering av utflödeshydrografer och tillgängliggjorde data för varje beräkning. Oavsett storlek på damm reproducerade Breacher goda resultat av dess haverier. Embrea däremot, som erbjöd mer avancerade fysiska modeller, visade sig svår att använda i praktiken. Begränsad dokumentation, avsaknad av felmeddelanden och märkliga resultatintervall vid stokastisk analys minskade tilltron till verktyget. Dessutom är en stor nackdel med Embrea det begränsade antal resultat som programmet genererar för stokastiska beräkningar.

Resultaten från fallstudierna visar också på skillnader i reproducerbarhet. Tousdammen var betydligt enklare att återskapa, mycket tack vare god tillgång på detaljerade data från tidigare studier. För fälttest 2-2002 var motsvarande underlag mer begränsat och innefattade större osäkerheter vilket resulterade i större avvikelser, särskilt vid användning av fysiskt baserade modeller där beräkningsantaganden blev mer utslagsgivande. Dessa skillnader antyder även att valet av modell bör anpassas efter dammens karaktär. För dammar med mer komplex intern struktur, zonindelning eller varierande erosionsbeteende, krävs metoder som kan fånga fler interna processer, vilket Embrea teoretiskt tillåter men inte lyckades hantera i praktiken i detta arbete. För enklare geometrier eller närmare analys av utflödesvariationer vid kända haveriparametrar, är enklare modeller som Breacher tillräckliga och ofta mer effektiva.

Vidare bör det också noteras att sannolikhetsbaserade metoder i sig inte ger någon information om konsekvenserna nedströms ett dammhaveri, utan endast fokuserar på att beskriva variationer i bräschens utflödeshydrograf. Trots att detta är centralt i en dammhaveribedömning vore det även nödvändigt att beskriva hur flödet påverkar den fysiska terrängen för att dessa resultat ska bli användbara i en verklig riskbedömning. Boxmodellerna är otillräckliga för detta ändamål och en hydrodynamisk modell krävs. En vidareutveckling vore således att integrera stokastiska beräkningar även i hydrodynamiska översvämningsmodeller, vilket skulle möjliggöra sannolikhetskartor för exempelvis översvämmade områden, flödeshastigheter och påverkan på kritisk infrastruktur.

6 Slutsatser

Dammhaveriberäkningar är förknippade med stora osäkerheter vilka är omöjliga att undvika, däremot kan sannolikhetsbaserade metoder skapa förutsättningar för att hantera dessa osäkerheter. Genom att utföra slumpmässigt baserade dammhaveriberäkningar där ett stort antal resultat av möjliga utfall genereras, skapas möjligheter att analysera spridningen och känsligheten i resultaten. Med hjälp av percentilanalyser och olika fördelningsdiagram underlättas kvantifiering av resultatets osäkerheter, vilket kan bidra till att skapa ett mer transparent beslutsunderlag jämfört med traditionella deterministiska analyser av dammhaverier.

Arbetet tydliggör att valet av sannolikhetsfördelningar för vilka dammhaveriparametrar tillåts variera inom har begränsad inverkan och inte bör ses som en avgörande faktor för dessa beräkningar Resultaten är snarare mer känsliga för de antagna variationsintervallen än fördelningsformen. Det är således viktigt att beakta att även stokastiska analyser av dammhaverier är beroende av och känsliga för modellantaganden. Särskillt känsligt är resultatet av dammhaveriberäkningarna för bräschens slutligt uppnådda bottenbredd, samt dess utvecklingstid vad gäller dammar med mindre magasinvolym.

Begränsningarna vid tillämpningen av probabilistiska metoder i detta arbete är främst kopplade till den praktiska genomförbarheten i programvarorna. Utöver det vore en intressant vidareutveckling i arbetet att integrera de stokastiska analyserna i hydrodynamiska översvämningsmodeller, då beräkningsverktygen i arbetet inte är avsedda för detta utan enbart genererar utflödeshydrografer. För att öka metodens användbarhet i riskanalyser, dammsäkerhetsutvärderingar och dammsäkerhetsklassificeringar vore därför även detta av intresse.

Sammantaget visar detta arbete att probabilistiska metoder har stor potential för framtidens dammhaveriberäkningar. De skapar ett bredare beslutsunderlag, gör osäkerheter synliga och ger möjlighet till känslighetsanalys av olika parametrar. Med fortsatt utveckling av metoder, programvara och användarstöd kan dessa metoder få en mer självklar roll i dammsäkerhetsarbetet och bidra till mer transparenta och robusta ananlyser av dammhaverier.

Referenser

Adria D, Martin V, McDougall S (2023). The role of sensitivity analysis in selecting dam breach parameters. Canadian Dam Association, CDA 2023 Annual Conference.

Ahmadisharaf E, Kalyanapu A.J, Thames B.A, Lillywhite J (2016). A probabilistic framework for comparison of dam breach parameters and outflow hydrograph generated by different empirical prediction methods, Environmental Modelling & Software, Volume 86. Pages 248-263. ISSN 1364-8152, DOI: https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.09.022

Alcrudo F & Mulet J (2007). Description of the Tous Dam break case study (Spain).Journal of Hydraulic Research,45(sup1), 45–57. DOI: https://doi.org/10.1080/00221686.2007.9521832

Andersson M, Lundström K, Rankka W, Rydell B (2008). Erosion och sedimenttransport i vattendrag. SGI samordningsansvar för stranderosion.

Apel H, Thieken A.H, Merz B et al. (2006). A Probabilistic Modelling System for Assessing Flood Risks. Nat Hazards 38, 79–100. DOI: https://doi-org.ezproxy.its.uu.se/10.1007/s11069-005-8603-7

Ashraf M, Hussein Soliman A, El-Ghorab E, El Zawahry A (2018). Assessment of embankment dams breaching using large scale physical modeling and statistical methods. Water Science, Volume 32, Issue 2, Pages 362-379, ISSN 1110-4929, DOI: https://doi.org/10.1016/j.wsj.2018.05.002

Azmi M & Thomson K (2024). Dam breach parameters: from data-driven-based estimates to 2-dimensional modeling. Nat Hazards 120, 4423–4461. DOI: https://doi-org.ezproxy.its.uu.se/10.1007/s11069-023-06382-3

Blom G, Enger J, Englund G, Grandell J, Holst L (2005). Sannolikhetsteori och statistikteori med tillämpningar. 4 uppl. Studentlitteratur.

Cederwall K & Larsen P (1979). Hydraulik för väg- och vattenbyggare. 2. uppl. Malmö: Liber-Läromedel.

CEDEX (1989). Revisión del estudio hidrológico de la crecida ocurrida en los días 20 y 21 de Octubre de 1982 en la Cuenca del Júcar. Madrid, Spanien.

Chen Y. H & Anderson B. A (1986). *Development of a Methodology for Estimating Embankment Damage Due to Flood overtopping.* US Federal Highway Administration Report No, FHWA/RD-86/126, Simons Li & Associates, Fort Collins, Colorado, USA.

Chow V. T (1959). Open-channel hydraulics.

Chow V. T, Maidment D. R, Mays L. W (1988). Applied hydrology. McGraw-Hill.

Da Silva, Alexandre Ângelo Carmo Luiz, Eleutério, J. C. (2023). Identifying and testing the probability distribution of earthfill dam breach parameters for probabilistic dam breach modeling. Journal of Flood Risk Management, 16(3), e12900. DOI: https://doi.org/10.1111/jfr3.12900

DHI (2025a). Mike 1D: DHI Simulation Engine for 1D river and urban modelling. Reference manual. Horsholm, Denmark.

DHI (2025b). Mike+: River Network Modelling. User Guide. Horsholm, Denmark.

Engelund F & Hansen E (1967). *A monograph on sediment transport in alluvial streams.* Copenhagen: Teknisk Forlag.

Forward Hydro (2024). Breach Hydro: Water Balance Suite for Stochastic Dam Break Analysis. Breach Hydro user Manual 2024-01. URL: https://forwardhydro.com.au/breach-hydro-product-1

Fread D. L (1988). *BREACH: an Erosion Model for Earthen Dam Failures*. Model description and User Manual, US National Weather Service.

Frisk E (2019). Normalfördelning. Statistisk ordbok. URL: https://www.statistiskordbok.se/ord/normalfordelning/ [Hämtad: 2025-01-18]

Froehlich D.C (1995). *Peak Outflow from Breached Embankment Dam*. Journal of Water Resources Planning and Management, vol. 121, no.1.

Goodell C (u.å.). A probabilistic Approach to Dam Breach Modeling. [PowerPoint presentation].

Hanson G. J & Cook K. R (2004). *Apparatus, Test Procedures, and Analytical Methods to Measure Soil Erodibility in Situ*. Applied Engineering in Agriculture, Vol. 20, 455-462.

HR Wallingford (u.å.). EMBREA. HR Wallingford. URL: https://www.dambreach.org/tools/embrea

Höeg K, Løvoll A and Vaskinn K. A (2004). *WP2.1 BREACH FORMATION - LARGE SCALE EMBANKMENT FAILURE*.

Larsson R (2008). Jords egenskaper. Statens geotekniska institut (SGI).

Macchione F, De Lorenzo G, Antonella Graziano A (2023). Study of key aspects in simplified modelling of man-made earthen dams breaching: breach shape, erosion process and hydraulics. Journal of Hydrology, Volume 620, Part A, 129425, ISSN 0022-1694, DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129425

Morris M.W & Hassan M (2005). IMPACT: Investigation of extreme flood processes and uncertainty - a European research project.

Morris M.W, Hassan M, Vaskinn K.(2007). *Breach Formation: Field test and laboratory experiments*. Journal of Hydraulic research. VOL 45 Extra Issue, 9-17.

Morris M, Hassan M, Goff C (2020). EMBREA-Web: a tool for the simulation of breach through dams and embankments. HR Wallingford Ltd, Wallingford, United Kingdom.

Peter S. J, Siviglia A, Nagel J, Marelli S, Boes R. M, Vetsch D &; Sudret B (2018). Development of probabilistic dam breach model using Bayesian inference. Water Resources Research, 54, 4376–4400. DOI: https://doi-org.ezproxy.its.uu.se/10.1029/2017WR021176

Pierce M.W, Thornton C.I, Abt S.R (2010). Predicting Peak outflow from Breached Embankment Dams. Colorado State University.

Regeringskansliet (2013). Dammsäkerhet. URL: https://www.regeringen.se/rattsliga-dokument/lagradsremiss/2013/09/dammsakerhet/

Říha J, Kotaška S, Petrula L (2020). Dam Break Modeling in a Cascade of Small Earthen Dams: Case Study of the Čižina River in the Czech Republic. Water; 12(8):2309. DOI:https://doi.org/10.3390/w12082309

SALib (2025). Basics — SALib's documentation - Read the Docs. SALib. https://salib.readthedocs.io/en/latest/user_guide/basics.html [Hämtad: 2025-05-22]

Sammen S.S, Mohamed T.A, Ghazali A.H, Sidek L.M, El-Shafie A (2017). An evaluation of existent methods for estimation of embankment dam breach parameters. Nat Hazards 87, 545–566. DOI: https://doi.org/10.1007/s11069-017-2764-z

Statens geotekniska institut (2023). Jords hållfasthet. URL: https://swedgeo.se/sv/Forskning--larand
om-geoteknik-och-miljogeoteknik/geoteknik-och-markmiljo/jordmateriallara/skjuvhallfastho
#contentfoot[Hämtad: 2025-02-12]

Svenska kraftnät (2018). Beredskapsplanering för dammhaveri och höga flöden: En kunskapssammanställning från Svenska kraftnät. Ärendenr: 2018/2219. Version: 2018-12-03.

Svenska kraftnät (2019). Dammar och dammteknik. En introduktion. SVK 2019/3255.

Svenska Kraftnät (2023a). Riktlinjer för dimensionerande flöde. Svenska Kraftnät. Riktlinjer för dimensionerande flöde | Svenska kraftnät [Hämtad: 2025-01-23].

Svenska kraftnät (2023b). Om dammhaverier. URL: https://www.svk.se/sakerhet-och-beredskap/dammsakerhet/beredskap-for-dammhaveri/om-dammhaverier/

Söderström A, Cederborg D, Broström S, Ligier P-L (2020). Metodik för hydraulisk modellering av torrfåror vid miljöanpassning av vattenkraft. Energiforsk. Energiforsk Rapport 2020:702.

Teal M. J & Wahlin B (2024). Best Practices for Dam Breach Inundation Mapping. WEST Consultants, Inc. San Diego, California, USA.

Thomson K & Redenbach M (2024). Breacher, version 2024-01-beta.01). Queensland: Forward Hydro. URL: https://forwardhydro.com.au/breach-hydro-product-1

Visser P. J (1998). *Breach Growth in Sand-Dikes*. Communication on Hydraulic and Geotechnical Engineering, TU Delft, Report no. 98-1.

Von Thun J. L & Gillette D.R (1990). *Guidance on Breach Parameters*. Denver, CO, USA.

Wahl T.L, Farrar J.A, Melena J, Mares D, Mefford B.W (1998). Prediction of Embankment Dam Breach Parameters: A Literature Review and Needs Assessment. DSO-98-004 Dam Safety.

Weisstein, E. W (2025). *Triangular Distribution.* From MathWorld–A Wolfram Web Resource. https://mathworld.wolfram.com/TriangularDistribution.html[Hämtad: 2025-05-13]

West M, Morris M, Hassan M (2018). A guide to breach prediction. HR Wallingford.

Yang C. T (1979). *Unit Stream Power Equation for total load*. Journal of Hydrology, 40, 123-138.

Yang J & Johansson N (2000). Re-production of dam breach in Noppikoski. International Conference HydroVision 2000, Charlotte, North Caroline, USA.

A Breacher

A.1 Setup-filer

```
@echo off
echo Working DIR %cd%

REM Sets the path to breacher.exe
Set Breacher="%cd%\..\..\..\..\BREACHER\2025-01-beta.03\breacher.exe"

REM Sets the path to the breacher control file
set bcf="%cd%\Tous_run.py"

REM The following line runs breacher with the control file
%Breacher% %bcf%

REM The following line pauses the command prompt to allow for reviewing
pause
```

Listing 1: Exempel: Batch-fil för att köra Breacher.exe

```
#
-----------------------------------------------------------------------
# SIMULATION CONTROL COMMANDS
Project_Name = "Tous_Run"
Failure_Type = "FFS"          # "SDF" for sunny day failure or "FFS"
                              # for flood failure scenario
Timestep = 60                 # seconds
Start_Time = 0                # hours
End_Time = 48                 # hours
Calc_Precision = 5            # decimals solved
Breach_Mode = "Comprehensive" # "Comprehensive" include a check of
                              # literature, "Manual" to turn off
Breach_Output = "Detailed"    # "Summary" to only write summary file,
                              # "Detailed" to output all calculations
Total_Simulations = 1         # number of simulations
Inflow_Factor = 1             # scale factor for inflow hydrographs
Breach_Factor = 1             # scale factor for breach width and time
#
-----------------------------------------------------------------------
# INPUT DBASE
BC_Inflow = "tous_inflow.csv"                        # dam inflow csv
inflow_name = "Inflow"                               # inflow column in the
                                                     # dam inflow csv
BC_Elev_Storage = "tous_elev_storage.csv"            # dam elevation-storage
                                                     # csv
BC_Elev_Outflow = "tous_elev_outflow.csv"            # dam elevation-outflow
                                                     #(ie spillway rating
                                                     # curve) csv
BC_Breach_Progression = "breach_progression_S1.csv"  # optional custom
                                                     # breach
                                                     # progression curve
                                                     #(ie linear, sine,
                                                     # non-linear)
BC_Flow_Tailwater = "None"                           # "flow_tailwater.csv"
                                                     # optional
                                                     # dam outflow to
                                                     # tailwater level
                                                     # csv, set to "None" if
                                                     # not
```

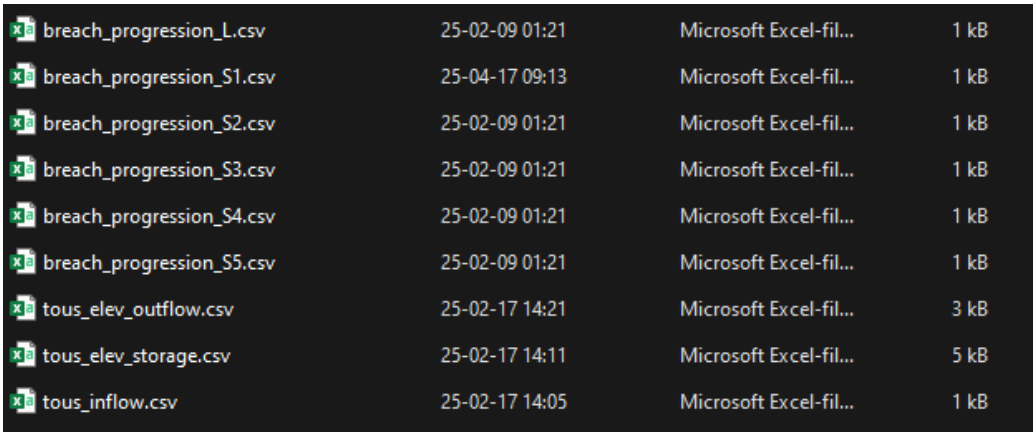
```
#
-----------------------------------------------------------------------
# BREACH PARAMETERS
Top_of_dam = 98.5           # Top of dam
Breach_Time = [1,1]         # breach time in hours
Initial_Storage = 84        # initial storage elevation at the dam
Failure_WSL = 99            # water surface level for failure commencement
Failure_Elev = 99           # elevation for failure commencement
Breach_Base = 60            # elevation at base of breach
Side_Slope = 1.6            # H:1V
Breach_Bot_Width = [27,27] # breach bottom with in meters
Weir_Cd = 1.5               # weir coefficient of discharge for the breach
Orifice_Cd = 0.4            # orifice coefficient of discharge for the breach
#
-----------------------------------------------------------------------
# COMPREHENSIVE PARAMETERS
# If "Comprehensive" is turned on in Breach_Mode
Dam_Crest_Width = 55         # Dam crest width
Z1 = 3.3                     # Slope of US dam face Z1 (H:V)
Z2 = 1.5                     # Slope of DS dam face Z2 (H:V)
Dam_Type = "Zoned_Fill"      # Options are "Core_wall", "Concrete_Faced",
                             # "Zoned_Fill" or "Homogeneous"
Dam_Erodibility = "Medium"  # Options are "Low", "Medium" or "High"
```

Listing 2: Exempel: Kommandofil för specificerade damm- och brottsparametrar för deterministiska beräkningar i Breacher.

```
#
-----------------------------------------------------------------------
# SIMULATION CONTROL COMMANDS
Project_Name = "Tous_Run"
Failure_Type = "FFS"           # "SDF" for sunny day failure or "FFS"
                               # for flood failure scenario
Timestep = [60,60]             # seconds
Start_Time = 0                 # hours
End_Time = 48                  # hours
Calc_Precision = 5             # decimals solved
Breach_Mode = "Comprehensive" # "Comprehensive" include a check of
                               # literature, "Manual" to turn off
Breach_Output = "Detailed"     # "Summary" to only write summary file,
                               # "Detailed" to output all calculations
Total_Simulations = 1000       # number of simulations
Inflow_Factor = [1,1]          # scale factor for inflow hydrographs
Breach_Factor = [0.95,1.05]    # scale factor for breach width and time
#
-----------------------------------------------------------------------
# INPUT DBASE
BC_Inflow = "tous_inflow.csv"                          # dam inflow csv
inflow_name = "Inflow"                                 # inflow column in the
                                                       # dam inflow csv
BC_Elev_Storage = "tous_elev_storage.csv"              # dam elevation-storage
                                                       # csv
BC_Elev_Outflow = "tous_elev_outflow.csv"              # dam elevation-outflow
                                                       #(ie spillway rating
                                                       # curve) csv
BC_Breach_Progression = "breach_progression_S1.csv"  # optional custom
                                                       # breach
                                                       # progression curve
                                                       #(ie linear, sine,
                                                       # non-linear)
BC_Flow_Tailwater = "None"                             # "flow_tailwater.csv"
```

```
                                                        # optional
                                                        # dam outflow to
                                                        # tailwater level
                                                        # csv, set to "None" if
                                                        # not
#
-----------------------------------------------------------------------
# BREACH PARAMETERS
Top_of_dam = 98.5           # Top of dam
Breach_Time = [0.5,4]       # breach time in hours
Initial_Storage = 84        # initial storage elevation at the dam
Failure_WSL = 99            # water surface level for failure commencement
Failure_Elev = [98.5,99]    # elevation for failure commencement
Breach_Base = [50,70]       # elevation at base of breach
Side_Slope = [0.7,1.8]      # H:1V
Breach_Bot_Width = [15,60]  # breach bottom with in meters
Weir_Cd = [1.2,1.6]         # weir coefficient of discharge for the breach
Orifice_Cd = [0.4,0.4]      # orifice coefficient of discharge for the breach
#
-----------------------------------------------------------------------
# COMPREHENSIVE PARAMETERS
# If "Comprehensive" is turned on in Breach_Mode
Dam_Crest_Width = 55         # Dam crest width
Z1 = 3.3                     # Slope of US dam face Z1 (H:V)
Z2 = 1.5                     # Slope of DS dam face Z2 (H:V)
Dam_Type = "Zoned_Fill"      # Options are "Core_wall", "Concrete_Faced",
                             # "Zoned_Fill" or "Homogeneous"
Dam_Erodibility = "Medium"   # Options are "Low", "Medium" or "High"
```

Listing 3: Exempel: Kommandofil för specificerade damm- och brottsparametrar för stokastiska beräkningar i Breacher.

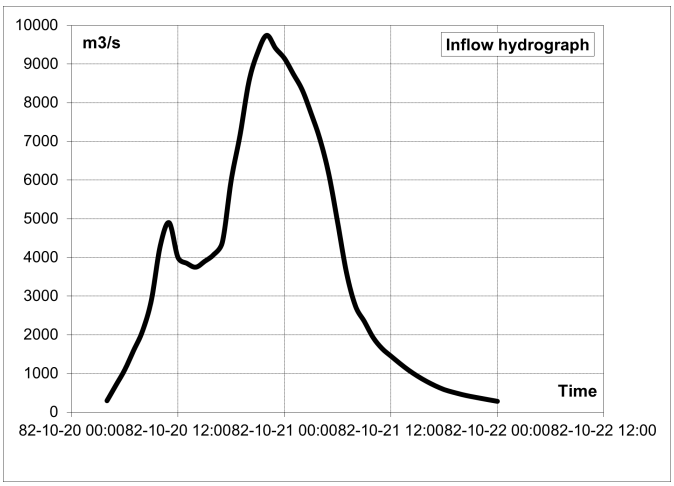


breach_progression_L.csv	25-02-09 01:21	Microsoft Excel-fil...	1 kB
breach_progression_S1.csv	25-04-17 09:13	Microsoft Excel-fil...	1 kB
breach_progression_S2.csv	25-02-09 01:21	Microsoft Excel-fil...	1 kB
breach_progression_S3.csv	25-02-09 01:21	Microsoft Excel-fil...	1 kB
breach_progression_S4.csv	25-02-09 01:21	Microsoft Excel-fil...	1 kB
breach_progression_S5.csv	25-02-09 01:21	Microsoft Excel-fil...	1 kB
tous_elev_outflow.csv	25-02-17 14:21	Microsoft Excel-fil...	3 kB
tous_elev_storage.csv	25-02-17 14:11	Microsoft Excel-fil...	5 kB
tous_inflow.csv	25-02-17 14:05	Microsoft Excel-fil...	1 kB

Figur 30: Exempel: Nödvändiga datafiler för beräkningar i Breacher.

	A	B	C
1	Time_hr,Inflow		
2	0,0		
3	1,0		
4	2,0		
5	3,0		
6	4,300		
7	5,700		
8	6,1100		
9	7,1600		
10	8,2100		

(a) Struktur för datafil.



(b) Utseende av datafil, i detta fall Tousdammens inflödeshydrograf.

Figur 31: Exempel: Uppbyggnad av nödvändig datafil, i detta fall Tousdammens inflödeshydrograf, för Breacher.

A.2 Python-script för plottar

```
#script for plotting hydrograph from breacher results

import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.lines as mlines
import os
import numpy as np
from datetime import timedelta, datetime

#set the directory containing the csv result files, specify summary file
directory = os.getcwd()
summary_file = 'summary.bsf'

#read summary file and peak flow column
file_path = os.path.join(directory, summary_file)
data = pd.read_csv(file_path)
peak_flow = data['Peak_Flow']

discharge = []
num_graphs = 0

plt.figure(figsize=(12, 8))

#iterate over all files in the directory
for filename in os.listdir(directory):
    if filename.endswith('.csv') and filename != 'literature.csv':
        num_graphs += 1
        #read the csv file
        file_path = os.path.join(directory, filename)
        data = pd.read_csv(file_path)

        #store discharge curves for extracting mean later
        discharge.append(data['total_outflow'])

        #plot graph of discharge against time
        plt.plot(data['time_hrs'], data['total_outflow'], color='grey',
```

```
    alpha=0.5)

#set title and legend based on the number of graphs
if num_graphs == 1:
    plt.title('Outflow Hydrograph')
    hydrograph_line = mlines.Line2D([], [], color='grey', label=f'Tous dam hydrograph, Peak Flow = {round(peak_flow.values[0], 0)} m /s')
    legend_handles = [hydrograph_line]
else:
    plt.title('Tous Dam Break Hydrographs')

    #calculate mean, median and percentile values
    mean_value = peak_flow.mean()
    median_value = peak_flow.median()
    low_percentile_value = np.percentile(peak_flow, 25)
    high_percentile_value = np.percentile(peak_flow, 75)

    #create list for indices of every graph
    index_dict = {
        '25th_percentile': [],
        '75th_percentile': [],
        'median': [],
        'mean': []
        }

    #find all hydrographs within +/- 1% of the values
    for index, value in peak_flow.items():
        if mean_value * 0.99 <= value <= mean_value * 1.01:
            index_dict['mean'].append(index)
        if median_value * 0.99 <= value <= median_value * 1.01:
            index_dict['median'].append(index)
        if low_percentile_value * 0.99 <= value <= low_percentile_value * 1.01:
            index_dict['25th_percentile'].append(index)
        if high_percentile_value * 0.99 <= value <= high_percentile_value * 1.01:
            index_dict['75th_percentile'].append(index)

    #define colors and labels for plotting
    plot_details = {
        'mean' : {'color': '#d31f11', 'label': f'Mean Hydrographs, Peak Flow = {round(mean_value, 0)} m /s'},
        'median': {'color': 'blue', 'label': f'Median Hydrographs, Peak Flow = {round(median_value, 0)} m /s'},
        '25th_percentile': {'color': 'yellow', 'label': f'25th Percentile Hydrographs, Peak Flow = {round(low_percentile_value, 0)} m /s'},
        '75th_percentile': {'color': 'orange', 'label': f'75th Percentile Hydrographs, Peak Flow = {round(high_percentile_value, 0)} m /s'}
        }

    #plot hydrographs
    for key, indices in reversed(index_dict.items()):
        for index in indices:
            plt.plot(data['time_hrs'], discharge[index], color=plot_details[key]['color'], linewidth=1, alpha=0.5)

    #create legend for plot
    legend_handles = []
    for key, detail in plot_details.items():
        legend_handles.append(mlines.Line2D([], [], color=detail['color'],
```

```
    label=detail['label']))

#read and plot given tous data from the excel file
excel_file_path = os.path.join(directory, 'tous_outflow.xlsx')
excel_data = pd.read_excel(excel_file_path)
excel_data['Time'] = excel_data['Time'] / 3600
plt.plot(excel_data['Time'], excel_data['Tous outflow (m3/s)'], color='black
    ', linewidth=1.5)
excel_tous_line = mlines.Line2D([], [], color='black', label=f'Observed
    Outflow, Peak Flow = {round(excel_data["Tous outflow (m3/s)"].max(), 1)}
    m  /s')


nmb_simulations_line = mlines.Line2D([], [], color='grey', label=f'Number of
     Breacher Simulations: {num_graphs}')
legend_handles.extend([excel_tous_line, nmb_simulations_line])

#show the plot
start_time = datetime(1982, 10, 20, 0, 0)
display_hours = list(range(0, 49, 3))
time_labels = [start_time + timedelta(hours=i) for i in display_hours]
plt.xticks(display_hours, [time.strftime('%H:%M') for time in time_labels],
    rotation=45)
plt.xlabel('Time')
plt.ylabel('Discharge [m3/s]')
plt.legend(handles=legend_handles, loc='upper right')
plt.show()
```

Listing 4: Pythonscript för plottning av utflödeshydrografer från beräkningar i Breacher.

```
#script for plotting peakflow distribution

import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.lines as mlines
from matplotlib.ticker import MaxNLocator
import numpy as np
import os
import glob

filename = 'summary.bsf'

#set the directory containing the summary file
directory = os.getcwd()

#read summary file and peak flow column
file_path = os.path.join(directory, filename)
data = pd.read_csv(file_path)
peak_flow = data['Peak_Flow']

#create a histogram with bins for the second plot
plt.figure(figsize=(12, 8))
plt.hist(peak_flow, bins=20, color='grey', alpha=0.7)

#calculate percentiles and mean
p_low = np.percentile(peak_flow, 25)
p_high = np.percentile(peak_flow, 75)
median = np.median(peak_flow)
mean = np.mean(peak_flow)

# calculate additional statistics
```

```
std_dev = np.std(peak_flow)
min_value = np.min(peak_flow)
max_value = np.max(peak_flow)

#print results in table format
summary_stats = pd.DataFrame({
    'Statistics': ['Mean', 'Standard Deviation', 'Minimum', 'Maximum'],
    'Peak Flow [$m^3/s$]': [f'{mean:.1f}', f'{std_dev:.1f}', f'{min_value:.1f}', f'{max_value:.1f}'],
})

print(summary_stats.to_string(index=False))

#add vertical lines for the percentiles, median, and mean
plt.axvline(p_low, color='yellow', linestyle='dashed', linewidth=3, label=f'25th Percentile: {p_low:.1f} m3/s')
plt.axvline(p_high, color='orange', linestyle='dashed', linewidth=3, label=f'75th Percentile: {p_high:.1f} m3/s')
plt.axvline(median, color='blue', linestyle='dashed', linewidth=3, label=f'Median: {median:.1f} m3/s')
plt.axvline(mean, color='#d31f11', linestyle='dashed', linewidth=3, label=f'Mean: {mean:.1f} m3/s')

#set labels and titles for the second plot
plt.title('Test 2-2002 Peak Outflow Distribution')
plt.xlabel('Peak Flow [m3/s]')
plt.ylabel('Frequency')
plt.legend()

#show the plots
plt.show()
```

Listing 5: Pythonscript för plottning av maxflödesfördelningen från beräkningar i Breacher.

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.colors as mcolors
import numpy as np
import os

filename = 'summary.bsf'

#Set the directory containing the summary file
directory = os.getcwd()

#Read summary file and peak flow column
file_path = os.path.join(directory, filename)
data = pd.read_csv(file_path)

#Extract necessary columns
breach_time = data['Breach_Time']
breach_width = data['Breach_Bot_Width']
peak_flow = data['Peak_Flow']

#Normalize peak flow for color mapping with rainbow scale
norm = mcolors.Normalize(peak_flow.min(), peak_flow.max())
colormap = plt.get_cmap('rainbow')

#Create the scatter plot
plt.figure(figsize=(12, 8))
scatter = plt.scatter(breach_width, breach_time, c=peak_flow, cmap=colormap,
```

```
    norm=norm)

#Add color bar
cbar = plt.colorbar(scatter)
cbar.set_label('Peak Flow [m3/s]')
cbar.set_ticks(np.linspace(peak_flow.min(), peak_flow.max(), num=6))
cbar.set_ticklabels(np.round(np.linspace(peak_flow.min(), peak_flow.max(),
    num=6), -3))

#Set labels and title
plt.xlabel('Breach Bottom Width [m]')
plt.ylabel('Breach Time [h]')
plt.title('Tous Dam Scatter Plot of Breach Time, Breach Width and Peak Flow'
    )

#Show the plot
plt.grid()
plt.show()
```

Listing 6: Pythonscript för plottning av spridningsdiagram över utvecklingstid, bottenbredd och maxflöde från beräkningar i Breacher.

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.lines as mlines
from matplotlib import colors as mcolors
from matplotlib.ticker import MaxNLocator
import os
import numpy as np

def plot_convergence(var, n, varname):
    mean = []
    for i in range(0, nb_samples):
        mean.append(var[0:i + 1].mean())

    plt.figure(figsize=(12, 8))
    plt.plot(np.arange(nb_samples), mean, c='k')
    plt.xlabel('Number of simulations', fontsize=20)
    plt.ylabel('Mean value of ' + varname, fontsize=20)
    plt.xticks(fontsize=20)
    plt.yticks(fontsize=20)
    plt.show()

def plot_percentiles(flows, breach_bot_width, breach_time, title):
    #create a figure and axis
    fig, ax = plt.subplots(figsize=(12, 8))

    #calculate the ratio for color normalization
    ratio = breach_bot_width / breach_time

    flow_dict = []

    #normalize the ratio for color mapping with rainbow scale
    norm = mcolors.Normalize(ratio.min(), ratio.max())
    colormap = plt.get_cmap('rainbow')

    #compute the corresponding percentiles
    percentiles = np.arange(1, len(flows) + 1) / len(flows) * 100

    #plot the data with scatter plot and color mapping
    scatter = ax.scatter(percentiles, flows, c=ratio, cmap=colormap, norm=
```

```
    norm)

    #set labels and title
    ax.set_title(title, fontsize=15)
    ax.set_xlabel('Percentile', fontsize=12)
    ax.set_ylabel('Peak Flow [m3/s]', fontsize=12)
    ax.set_xticks(np.arange(0, 101, 5))
    ax.set_xticklabels([f'$x_{{{xtick / 100:.2f}}}$' if xtick in [0, 25, 50, 75, 100] else "" for xtick in np.arange(0, 101, 5)])
    ax.tick_params(axis='both', which='major', labelsize=12)
    ax.grid(ls='--')

    #create colorbar
    cbar = fig.colorbar(scatter, ax=ax)
    cbar.set_label("Erosion Rate [m/h]", fontsize=12)
    cbar.ax.tick_params(axis='both', labelsize=12)

    #show plot
    plt.show()

#set the directory containing the summary result files
directory = os.getcwd()
summary_file = 'summary.bsf'

#read summary file
file_path = os.path.join(directory, summary_file)
data = pd.read_csv(file_path)

#input parameters
Breach_Bot_Width = data['Breach_Bot_Width']
Breach_Time = data['Breach_Time']
Side_Slope = data['Side_Slope']
Weir_coeff = data['Weir_Cd']
Peak_Flow = data['Peak_Flow']

#plot convergence
q = [0.025, 0.25, 0.5, 0.75, 0.975]
for parameter in [Peak_Flow, Breach_Bot_Width, Breach_Time, Side_Slope, Weir_coeff]:
    nb_samples = len(parameter)
    plot_convergence(parameter, nb_samples, parameter.name)


#sensitivity analysis of input parameters using SALib
from SALib.analyze.rbd_fast import analyze

problem = {
    'num_vars': 4,
    'names': ['Breach_Bot_Width', 'Breach_Time', 'Side_Slope', 'Weir_coeff'],
    'bounds': [[Breach_Bot_Width.min(), Breach_Bot_Width.max()],
               [Breach_Time.min(), Breach_Time.max()],
               [Side_Slope.min(), Side_Slope.max()],
               [Weir_coeff.min(), Weir_coeff.max()]],
}

#stacking all input variables into a 2-D array
X = np.stack((Breach_Bot_Width, Breach_Time, Side_Slope, Weir_coeff), axis=1)

```

```
#running the SALib rbd_fast analysis
Peak_Flow = np.array(data['Peak_Flow'], dtype=float)
Si = analyze(problem, X, Peak_Flow)

#printing 1st order sensitivity indices
print(Si['names'])
print([float(x) for x in Si['S1']])


#printing peak flow percentiles
data_sorted = data.sort_values(by=['Peak_Flow'])
plot_percentiles(data_sorted['Peak_Flow'],data_sorted['Breach_Bot_Width'],
    data_sorted['Breach_Time'], title="Stochastic Peak Flow Percentiles")

#plot 1st order sensitivity indices
plt.figure(figsize=(12, 4))
x = np.arange(len(Si['S1']))
plt.scatter(x, Si['S1'], color='r', s=30)
plt.xticks(x, ['Breach Bottom Width','Breach Time', 'Side Slope', 'Weir
    Coefficient'], fontsize=12)
plt.yticks(fontsize=12)
plt.ylim(0, 1)
plt.title('1st order sensitivity indices', fontsize=15)
plt.grid(ls='--')
plt.show()
```

Listing 7: Pythonscript för att genomföra och plotta känslighetsanalysen av Breacher-resultatet.

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import os
from scipy.stats import linregress

filename = 'summary.bsf'

#set the directory containing the summary file
directory = os.getcwd()

#read summary file and peak flow column
file_path = os.path.join(directory, filename)
data = pd.read_csv(file_path)

#extract necessary columns
Cd = data['Weir_Cd']
peak_flow = data['Peak_Flow']
breach_bot_width = data['Breach_Bot_Width']
breach_time = data['Breach_Time']
side_slope = data['Side_Slope']

#function to create scatter plot and perform linear regression
def plot_scatter_and_regression(x, y, xlabel, ylabel, title):
    #perform linear regression
    k, m, r, p, std_err = linregress(x, y)

    #predict y values based on linear model
    y_pred = k * x + m

    #calculate determination coefficient R
    r2 = r**2

```

```
    #print the slope and R   coefficient
    print(f'lutningskoefficient (k): {k}')
    print(f'intercept (m): {m}')
    print(f'R  : {r2}')

    #create the scatter plot
    plt.figure(figsize=(12, 8))
    plt.scatter(x, y)

    #plot the regression line
    plt.plot(x, y_pred, color='red', linewidth=2, label=f'R  ={round(r2, 5)}
    ')

    #set labels and title
    plt.xlabel(xlabel, fontsize=20)
    plt.ylabel(ylabel, fontsize=20)
    plt.title(title, fontsize=20)
    plt.legend(loc='upper right', fontsize=20)

    #show the plot
    plt.grid()
    plt.show()

#plot for `Weir_Cd`
plot_scatter_and_regression(Cd, peak_flow, 'Weir Cd', 'Peak Flow [m3/s]', '
    Tous Dam Scatter Plot of Peak Flow and Weir Cd')

#plot for `Breach_Bot_Width`
plot_scatter_and_regression(breach_bot_width, peak_flow, 'Breach Bottom
    Width [m]', 'Peak Flow [m3/s]', 'scatter plot of peak flow and breach
    bottom width')

#plot for `Breach_Time`
plot_scatter_and_regression(breach_time, peak_flow, 'Breach Time [h]', 'Peak
     Flow [m3/s]', 'scatter plot of peak flow and breach time')

#plot for `Side_Slope`
plot_scatter_and_regression(side_slope, peak_flow, 'Side Slope [H:1V]', '
    Peak Flow [m3/s]', 'scatter plot of peak flow and side slope')
```

Listing 8: Pythonscript för att plotta olika spridningsdiagram av Breacher-resultatet.

B Embrea

B.1 Setup-filer

tous_downstream.csv	25-03-17 08:49	Microsoft Excel-fil...	1 kB
tous_reservoir.csv	25-03-06 09:59	Microsoft Excel-fil...	5 kB
tous_spillway_ratingcurve.csv	25-03-10 16:14	Microsoft Excel-fil...	3 kB
tous_upstream.csv	25-04-07 08:26	Microsoft Excel-fil...	1 kB

Figur 32: Exempel: Nödvändiga datafiler för beräkningar i Embrea.

B.2 Pythonscript för plottar

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.lines as mlines
import matplotlib.dates as mdates
from datetime import timedelta, datetime
import os
import re
import numpy as np

#set the current working directory containing EMBREA results
directory = os.getcwd()

#function for parsing lines correctly
def parse_line(line):
    #use re to keep text in brackets together, define as our pattern
    pattern = re.compile(r"\[.*?\]|\S+")
    values = pattern.findall(line)

    #if the row misses values, extend with 0.0
    while len(values) < 12:
        values.append("0.0")

    return values[:12]

#create a figure
plt.figure(figsize=(12, 8))

#process each .flw file in the directory
for filename in os.listdir(directory):
    if filename.endswith('.flw'):
        file_path = os.path.join(directory, filename)

        #read file row by row, delete empty rows
        with open(file_path, "r") as f:
            lines = [line.strip() for line in f if line.strip()]

        #extract column names and read the data of the rest of file
        columns = parse_line(lines[0])
        data = [parse_line(line) for line in lines[1:]]
        df = pd.DataFrame(data, columns=columns)

        #convert to numeric if possible
        for col in df.columns:
```

```
            try:
                df[col] = pd.to_numeric(df[col])
            except ValueError:
                pass  # If conversion fails, keep it as a string

        #plot hydrograph
        df['Time'] = pd.to_datetime(df['Time'], unit='s', origin='unix')
        name = filename.replace(".flw", "")
        peak = round(df["Q_Total"].max(),1)
        plt.plot(df['Time'], df['Q_Total'], linewidth=1.5, label=f'{name}, Peak Flow = {peak} m3/s')

#read and plot given tous data from the Excel file
excel_file_path = os.path.join(directory, 'tous_outflow.xlsx')
excel_df = pd.read_excel(excel_file_path)
excel_df['Time'] = pd.to_datetime(excel_df['Time'], unit='s', origin='unix')
plt.plot(excel_df['Time'], excel_df['Tous outflow (m3/s)'], color = 'black', linewidth=1.5,
label=f'Observed Outflow, Peak Flow = {round(excel_df["Tous outflow (m3/s)"].max(),1)} m3/s')

#plot figure
plt.title('Outflow Hydrographs')
plt.gca().xaxis.set_major_locator(mdates.HourLocator(interval=3))
plt.gca().xaxis.set_major_formatter(mdates.DateFormatter('%H:%M'))
start_time = df['Time'].min().normalize()
plt.gca().set_xticks(mdates.drange(start_time, start_time + timedelta(days=2.125), timedelta(hours=3)))
plt.xticks(rotation=45)
plt.tight_layout()
plt.xlabel('Time')
plt.ylabel('Discharge [m3/s]')
plt.legend(loc='upper right')

#show the plot
plt.show()
```

Listing 9: Exempel: Pythonscript för plottning av utflödeshydrografer från deterministiska beräkningar i Embrea.

C Mike+

C.1 Python-script för plottar

```
#script for plotting hydrograph from Mike+ d50 deterministic results
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import os
import re

#set the current working directory containing Mike+ results
directory = os.getcwd()

#create a figure
plt.figure(figsize=(12, 8))

def convert_seconds_to_datetime(seconds):
    return pd.Timestamp('1982-10-20') + pd.to_timedelta(seconds, unit='s')

```

```python
#process each Excel file in the directory
for filename in os.listdir(directory):

    if filename == 'tous_outflow.xlsx':
        excel_path = os.path.join(directory, filename)
        data = pd.read_excel(excel_path)
        data['Time'] = data['Time'].apply(convert_seconds_to_datetime)
        plt.plot(data['Time'], data['Tous outflow (m3/s)'], color = 'black', linewidth=1.5, label=f'Observed Outflow, Peak Flow = {data["Tous outflow (m3/s)"].max()} m3/s')
    elif filename.endswith('.xlsx'):
        excel_path = os.path.join(directory, filename)
        data = pd.read_excel(excel_path)
        data['Time'] = pd.to_datetime(data['Time'], format='%Y-%m-%d %H:%M:%S')
        plt.plot(data['Time'], data['Outflow (m3/s)'], linewidth=1.5,
                 label=f'Tous Dam Break Hydrograph, Peak Flow = {data["Outflow (m3/s)"].max()} m3/s')

#show the plot
plt.title('Outflow Hydrographs' if len(os.listdir(directory)) > 1 else 'Outflow Hydrograph', fontsize=12)
plt.xlabel('Time')
plt.ylabel('Discharge [m3/s]')
plt.legend(loc='upper right')
plt.gca().xaxis.set_major_formatter(plt.matplotlib.dates.DateFormatter('%H'))
plt.show()
```

Listing 10: Exempel: Pythonscript för plottning av utflödeshydrografer från deterministiska beräkningar i Mike+.