



LUND UNIVERSITY

Klimatförändringars inverkan på broars säkerhet och prestanda

En översyn av potentiella effekter och anpassningsåtgärder

Nasr, Amro; Larsson Ivanov, Oskar; Björnsson, Ivar; Honfi, Daniel; Johansson, Jonas; Kjellström, Erik

2019

Document Version:

Förlagets slutgiltiga version

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Nasr, A., Larsson Ivanov, O., Björnsson, I., Honfi, D., Johansson, J., & Kjellström, E. (2019). *Klimatförändringars inverkan på broars säkerhet och prestanda: En översyn av potentiella effekter och anpassningsåtgärder*. (TVBK; Nr 3072). Lund University.

Total number of authors:

6

General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00

Klimatförändringars inverkan på broars säkerhet och prestanda

- En översyn av potentiella effekter
och anpassningsåtgärder

Amro Nasr, Konstruktionsteknik LTH
Oskar Larsson Ivanov, Konstruktionsteknik LTH
Ivar Björnsson, Konstruktionsteknik LTH
Dániel Hónfi, Träbyggande och boende RISE
Jonas Johansson, Riskhantering och Samhällssäkerhet LTH
Erik Kjellström, Rossby Centre SMHI



Rapport TVBK-3072
ISBN 978-91-87993-13-8
Lunds Tekniska Högskola
Konstruktionsteknik
Box 118
221 00 LUND
2019

Förord

Denna rapport är en sammanfattning av resultat från studier som presenteras i två vetenskapliga artiklar; *A review of the potential impacts of climate change on the safety and performance of bridges* (Sustainable and Resilient Infrastructure) och *Bridges in a changing climate: A study of the potential impacts of climate change on bridges and their possible adaptations* (Structure and Infrastructure Engineering, ej publicerad). Dessa studier är en del av ett forskningsprojekt som utförs vid avdelningen för Konstruktionsteknik, Lunds Tekniska Högskola, i samarbete med avd. för Riskhantering och Samhällssäkerhet vid LTH, RISE och Rossby Centre vid SMHI. Rapporten är en del av projekt finansierade av Trafikverket, Formas och det strategiska innovationsprogrammet Infrasweden2030. Vi vill tacka för möjligheten att genomföra dessa studier.

Författarna

Länkar till ursprungsartiklar:

A review of the potential impacts of climate change on the safety and performance of bridges, <https://doi.org/10.1080/23789689.2019.1593003>

Bridges in a changing climate: A study of the potential impacts of climate change on bridges and their possible adaptations, Under granskning

Sammanfattning

Vår infrastruktur kommer att påverkas av klimatförändringar, både nu och i framtiden. För att kunna säkerställa infrastrukturens funktion och uppfylla de säkerhetskrav som finns kommer det därför att krävas investeringar i anpassningsåtgärder. Men åtgärder bör inte tas på utifrån bristfällig kunskap, det är därför väsentligt att i förväg kartlägga vilka typer av påverkan som kan förväntas och vilka åtgärder som är rimliga att genomföra. Denna rapport sammanfattar resultat från studier av risker med klimatförändringar och dess potentiella effekter på broar, då dessa konstruktioner kan komma att påverkas av olika ändringar i klimatet. I studierna har 243 forskningsartiklar och rapporter från hela världen gått igenom för att identifiera potentiella risker för broar på grund av ändringar i klimatet. Det bör nämnas att resultaten i rapporten inte är fokuserade på Sverige utan har ett internationellt perspektiv; de flesta av de identifierade riskerna är dock relevanta för svenska förhållanden, medan andra är mer relevanta i andra delar av världen.

Totalt har 31 olika risker identifierats och kategoriserats i sju olika huvudkategorier enligt följande:

- Beständighet (riskgrupp D),
- Funktion (riskgrupp S),
- Geoteknik (riskgrupp G),
- Ökad belastning (riskgrupp I),
- Olyckslaster (riskgrupp A),
- Extrema naturhändelser (riskgrupp E)
- Drift (riskgrupp O).

Utöver dessa riskkategorier har även en kortare analys av samverkande händelser gjorts, dvs. händelser där två eller flera klimatfaktorer eller effekter samverkar och ger en större sammantagen effekt än om de inträffar var för sig. En avslutande del om möjliga anpassningsåtgärder har även inkluderats, där metoder funna i litteraturen för att hantera de olika riskerna som identifierats beskrivs.

Den viktigaste slutsatsen i rapporten är att ett stort antal risker finns för broar. Föreliggande rapport bidrar därmed till att lyfta fram dessa risker och synliggöra dess effekter. De två klimatfaktorer som påverkar flest risker för broar är temperaturhöjning och ökad eller minskad nederbörd, de kan individuellt eller kombinerat påverka 25 av de 31 identifierade riskerna. Beroende på förutsättningarna för en specifik bro (dvs. geografiskt läge, platsegenskaper, konstruktivt system, etc.) varierar de potentiella klimatteffekterna och deras möjliga konsekvenser. En bedömning av sannolikheten för en viss risk att inträffa, eller en prioritering av de olika riskerna, tas därmed inte upp i rapporten. Sådana mer detaljerade kontextspecifika studier pågår och kommer att redovisas framöver inom ramen för projektet.

Innehållsförteckning

Förord	3
Sammanfattning	4
Innehållsförteckning	5
1. Inledning	7
2. Utsläppsscenarioer och relevanta klimatförändringar	9
3. Metod	12
4. Risker för broar på grund av klimatförändringar	13
4.1 Riskgrupp D: Beständighetsrisker	13
Risk D1: Accelererad nedbrytning av överbyggnad	13
Risk D2: Accelererad nedbrytning av underbyggnad	15
4.2 Riskgrupp S: Funktionsrisker	16
Risk S1: Värmeinducerad skada på vägbeläggningar och järnvägsräls	16
Risk S2: Risk för ökade långtidsdeformationer	16
4.3 Riskgrupp G: Geotekniska risker	17
Risk G1: Högre erosionshastigheter	17
Risk G2 och risk G3: Högre risk för kollaps av omgivande broslänter och högre risk för jordskred	18
Risk G4: Högre risk för sättningar	18
Risk G5: Högre risker för bergskred, flöden av skräp och snöskred ..	19
Risk G6: Högre risk för jordförvätskning	19
Risk G7: Extra belastning på pålar som kan leda till överbelastning .	20
Risk G8: Skador på grund av krympning och svällning av lera	20
4.4 Riskgrupp I: Ökad belastning	20
Risk I1: Högre vågpåverkan på pelare och fundament	20
Risk I2: Högre vindlast	21
Risk I3: Högre snölast	21
Risk I4: Högre risk för termiskt inducerade spänningar	21
Risk I5: Ökade krav på dräneringskapacitet	22
Risk I6: Högre hydrostatiskt tryck bakom landfästen	22
Risk I7: Ökad belastning på broar med styrluckor	22
Risk I8: Ökade spänningar på grund av snabbare förlust av förspänningskraft	22

Risk I9: Högre belastning på grund av isbildning	22
4.5 Riskgrupp A: Olycksrelaterade risker	23
Risk A1: Högre risk för fartygskollisioner	23
Risk A2, risk A3 och risk A4: Högre risk för kollisioner bil-bropelare, tåg- bropelare, samt trafikolyckor.....	23
4.6 Riskgrupp E: Extrema naturhändelser (naturkatastrofer)	24
Risk E1: Ökning av intensitet hos och/eller frekvens av översvämningar	24
Risk E2: Ökning av intensitet hos och/eller frekvens av stormar och stormfloder.....	25
Risk E3: Ökning av intensitet hos och/eller frekvens av bränder.....	25
4.7 Riskgrupp O: Drift	25
Risk O1: Ytterligare driftskostnader för snöborttagning	25
Risk O2: Mer frekventa tillfälliga brobegränsningar	25
Risk O3: Ökad risk för elbrist.....	26
4.8 Samverkande risker	26
5. Möjliga anpassningsåtgärder	28
6. Diskussion, slutsatser och fortsatt arbete.....	35
7. Referenser	40

1. Inledning

Klimatförändringar nu och i framtiden kan få stor inverkan på vår infrastruktur och kräver åtgärder, inte bara för att minska utsläppen av växthusgaser genom internationella miljöavtal, t.ex. 2015 års Parisavtal (UNFCCC 2015), utan också för att anpassa befintlig infrastruktur och öka dess motståndskraft mot effekter från klimatförändringar. Förutom anpassning är det också relevant att reformera underhålls- och inspektionsplaner för att inkludera effekter av klimatförändringar för befintlig infrastruktur. När det gäller framtida infrastruktur som ska byggas kan dimensionerings- och byggregler behöva uppdateras för att ta hänsyn till effekterna av klimatförändringar.

Nödvändigheten i att studera potentiella effekter av framtida klimatförändringar på infrastruktur styrks även av flera andra faktorer. Ett exempel är att föreslagna förändringar i dagens etablerade regelsystem måste vara väl underbyggda av forskningsresultat samt noggrant granskade av omvärlden och ingenjörssamfund innan de kan inkluderas. Eftersom denna process kan ta lång tid är det därför viktigt att redan nu studera potentiella effekter och anpassningar till klimatförändringar. Ett exempel är processen att implementera resultat från forskningsprogrammet Superpave i dimensioneringsregler för beläggningar (Meyer 2008). Trots ett beslut under tidigt 1990-tal om att inkludera resultat från programmet i standarden, uppdaterades inte dokumenten förrän 2005, dvs 15 år senare. Ett annat exempel är partialkoefficientmetoden som används i dagens konstruktionsregler. Grunderna för denna metod togs fram på 1940-talet, se t.ex. Freudenthal (1945) och Torroja & Paez (1949), men det var inte förrän 1963 som metoden inkluderades i rekommendationer från CEB (Comité Européen du Béton, 1963).

Även skydds- och anpassningsåtgärder kan komma att ta mycket lång tid att genomföra, vilket ytterligare visar att det är väsentligt att redan nu studera möjliga åtgärder. Hill (2012) visade hur många stora skyddsprojekt har tagit mycket lång tid då det t.ex. krävts stöd från samhället, finansiering, utvärderingar och preliminära designar innan byggnationen ens påbörjats. Två exempel är MOSE-projektet i Venedig och översvämningsskyddet Maeslant i Rotterdam. I Venedig påbörjades processen efter översvämningen 1966, men de skyddande barriärerna är fortfarande inte färdigbyggda, mer än 50 år senare. Själva projektet startade 2003, dvs. hade en inledande fas på 37 år. Maeslant-projektet startade 1989 och sattes i bruk 1997, men den inledande fasen för att påbörja projektet startade redan 1953, vilket innebär att det tog 44 år innan det var färdigt.

Trots nödvändigheten i att inleda processer för klimatanpassning tidigt på grund av de långa ledtiderna finns det idag endast ett fåtal studier där potentiella effekter på infrastruktur tas upp, se t.ex. Kumar & Imam (2013); Meyer (2008); Mondoro et al. (2018); Schwartz (2010). Syftet med denna rapport är att belysa den kunskapslucka som finns angående potentiella effekter av klimatförändringar på broar genom att presentera

en identifiering av de möjliga risker som kan uppkomma och möjliga anpassningsstrategier till dessa.

Eftersom broar har en lång tilltänkt livslängd, ibland mer än 100 år, är det viktigt att utvärdera hur de klarar av de risker som kan uppkomma på grund av klimatförändringar. Även om endast förväntningar att klimatförändringarna kommer att öka frekvensen eller intensiteten för extrema händelser, t.ex. översvämningar, gör att det är viktigt att studera om dagens broar kan klara av dessa händelser och hur de kan återställas vid möjliga skador.

I denna rapport sammanfattas de risker som kan relateras till klimatförändringar och kan påverka broar, oberoende av hur sannolika dessa risker är eller vilka konsekvenser de kan få. Även om broar är studiernas huvudfokus, kan även andra delar av infrastrukturen påverkas av samma riskkällor. Att göra denna typ av bredare identifiering motiveras av att undvika att missa potentiellt väsentliga risker som kan verka triviala vid första anblicken. Denna typ av riskidentifiering med en så komplett lista som möjligt har tidigare framhävts av t.ex. Chapman (2001), Kaplan, Haines, & Garrick (2001), och Raspotnig & Opdahl (2013). Fortsatta studier kommer att göras där kritiska risker kan identifieras och prioriteras.

Denna rapport startar med en kortfattad översikt av de förväntade klimatförändringarna följt av en beskrivning av metodiken som använts för att identifiera effekter relaterade till dessa klimatförändringar. De identifierade riskerna presenteras, följt av hur de potentiellt kan samverka med varandra. Rapporten fortsätter med en översikt över möjliga anpassningsåtgärder för att hantera de identifierade riskerna och avslutas med en diskussion och slutsatser från studierna. Studien har ett internationellt perspektiv och är inte avgränsad till någon region eller land.

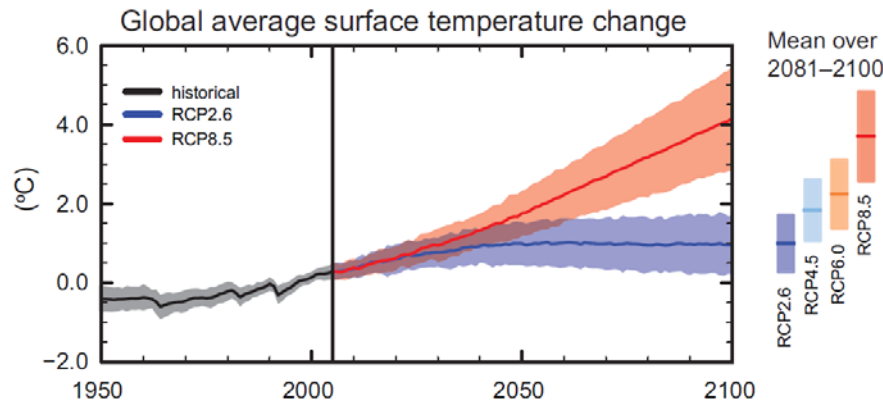
2. Utsläppsscenarioer och relevanta klimatförändringar

Många klimatförändringsscenarioer har definierats i litteraturen. I den femte och senaste utvärderingsrapporten (AR5) refererar den mellanstatliga panelen för klimatförändringar (IPCC) till fyra olika scenarier, RCP 2,6 (Representative Concentration Pathway), RCP 4,5, RCP 6,0 och RCP 8,5 (IPCC 2013; IPCC 2014). Numret som identifierar varje scenario representerar den ungefärliga strålningsdrivningen (RF), i W/m^2 , antingen år 2100 eller vid stabilisering därefter, jämfört med år 1750 som representerar förindustriella nivåer. RF är ett mått på förändringen i energiflödet per yta; uppvärmning är ett resultat av positiv strålningsdrivning medan negativ strålningsdrivning resulterar i nedkylning (IPCC 2013).

RCP 2,6 är ett relativt optimistiskt scenario där kraftfulla åtgärder behöver genomföras för att begränsa växthusgasutsläppen. Detta scenario ger en topp på $3 W/m^2$ i RF som inträffar före 2100 följt av en nedgång till $2,6 W/m^2$ vid 2100 (IPCC 2014). En snabb nedgång i oljeförbrukningen, en världsbefolkning på cirka 9 miljarder år 2100 och en betydande ökning i användning av bioenergi är bland de antaganden som utgör detta scenario (Van Vuuren et al. 2011). I scenariot projiceras en uppvärmning på $0,3 ^\circ C$ till $1,7 ^\circ C$ i slutet av seklet. Den andra extremen är RCP 8,5, ett scenario med höga växthusgasutsläpp, som resulterar i en RF på cirka $8,5 W/m^2$ år 2100 (Van Vuuren et al. 2011). Detta är ett mycket energiintensivt scenario som förutsätter snabb befolkningstillväxt med en befolkning på nära 12 miljarder år 2100, en blygsam inkomstökning och en låg teknisk utveckling (Riahi et al. 2011; Van Vuuren et al. 2011). I IPCC:s specialrapport om global uppvärmning på $1,5 ^\circ C$ (IPCC 2018) hävdas att även åtgärder som återspeglar de nuvarande nationellt överenskomna ambitionerna, det vill säga i Parisavtalet, inte skulle begränsa den globala uppvärmningen till $1,5 ^\circ C$. Enligt Rogelj et al. (2016) skulle genomförandet av dessa åtgärder ändå ge en medianuppvärmning av $2,6 ^\circ C$ till $3,1 ^\circ C$ före 2100. Oavsett hur framtiden utvecklas (d.v.s. även i en värld med $1,5 ^\circ C$) kommer det framtida klimatet att vara väsentligt annorlunda än dagens (IPCC 2018).

Med tanke på den stora spridningen mellan scenarierna och de många antaganden som är gjorda, blir den stora osäkerhet som finns i projiceringen av det framtida klimatet uppenbar, adderat till den osäkerhet som är ett resultat av ofullständig förståelse av klimatsystemet och hur detta kan representeras i olika klimatmodeller samt den stora naturliga variabiliteten i klimatet. Därför påverkar det valda scenariot starkt klimatförändringarnas storlek och dess olika parametrar eller fenomen. Exempelvis visar Figur 1 projicerade förändringar för den globala genomsnittliga ytemperaturen för de fyra scenarierna (IPCC, 2013). Det bör dock noteras att det finns en överensstämmelse

om utvecklingen av många klimatparametrar och fenomen mellan projektionerna baserat på de fyra scenarierna. De klimatförändringar som är relevanta för denna studie presenteras i Tabell 1.



Figur 1. Förändringar i den globala genomsnittliga yttemperaturen i förhållande till 1986-2005 för olika utsläppsscenarioer (IPCC, 2013).

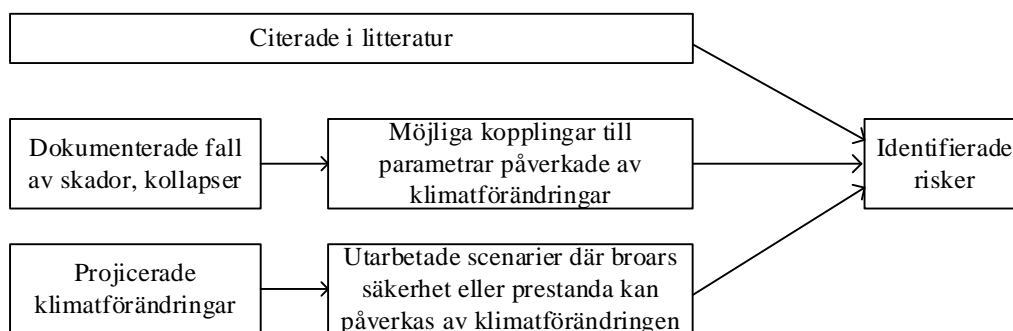
Förutom förändringarna som presenteras i Tabell 1 kan samverkande händelser också påverkas av klimatförändringar. Samverkande händelser definieras som fall där två eller fler händelser, som inte nödvändigtvis själva är extrema, inträffar samtidigt eller kort efter varandra, vilket kan leda till kraftig påverkan (IPCC 2012). I januari 2012 var det nära att en allvarlig översvämning i Nederländerna inträffade som ett resultat av sådana samverkande händelser. Intensiv nederbörd över Rhens avrinningsområde följt av en stormvåg resulterade i denna potentiellt kritiska händelse (Van den Hurk et al. 2015). Ändringar i mönstren för sådana samverkande händelser på grund av klimatförändringar är svåra att prediktera givet att de inte inträffar ofta. Detta gäller särskilt för de mest extrema händelserna.

Tabell 1. Projicerade framtida trender för olika klimatparametrar/fenomen. Med regioner avses ett större geografiskt område, t.ex. del av en kontinent, som har liknande klimatförutsättningar. För detaljerade studier i en viss region behöver man ta hänsyn till de specifika förändringarna för den aktuella regionen.

Klimatparameter / fenomen	Förändringstrend	Referens(er)
Temperatur (T)	- Högre globalt medelvärde (T ↑) - Större säsongvariationer på vissa ställen (T↔)	IPCC (2013) Imada et al. (2017)
Värmeböljor (HW)	- Ökad intensitet och/eller frekvens (HW ↑)	Världsbanken (2012) IPCC (2013)
Solstrålning (SR)	- Möjlig ökning i vissa regioner (SR ↑) - Möjlig minskning i vissa regioner (SR ↓)	McKenzie et al. (2011) Ohunakin et al. (2015) Jerez (2015)
Nederbörd (P)	- Ökning av intensitet och/eller frekvens i vissa regioner (P ↑) - Minskad intensitet och/eller frekvens i andra regioner (P ↓) - Ökning i kontrast mellan våta och torra regioner och årstider (P↔)	IPCC (2013)
Snöfall (SF)	- Ökning av intensitet och/eller frekvens i vissa regioner (SF ↑)	IPCC (2013)
Relativ luftfuktighet (RH)	- Minskad relativ fuktighet över land för de flesta regioner. (RH ↓) - Ökning av relativ fuktighet över land för vissa regioner under vissa scenarier (RH ↑)	IPCC (2013)
Vind (W)	- Ökning av hastigheten i vissa regioner under vissa årstider (W ↑) - Minskad hastighet under andra årstider (W ↓) - Ökad intensitet och/eller frekvens av extrema vindhändelser (W ↑)	IPCC (2013) Cradden et al. (2006) Bloom, et al. (2008)
Jordens salthalt (SS)	- Ökning i vissa regioner (SS ↑)	Dasgupta et al. (2015)
Stormar (S)	- Ökning av intensitet och/eller frekvens i vissa regioner (S ↑) - Minskad intensitet och/eller frekvens i vissa regioner (S ↓)	IPCC (2013)
Havsnivå (SLR)	- Havsnivåhöjning (SLR)	IPCC (2013)
Koldioxidkoncentrationer i atmosfären och oceanerna (CC)	- En ökning av koldioxidkoncentrationerna i atmosfären och i oceanerna (CC ↑)	IPCC (2013)
Havstemperatur (OT)	- En ökning av havstemperaturen (OT ↑)	IPCC (2013)
Avrinning (RO)	- Högre årlig genomsnittlig avrinning i vissa regioner (RO ↑)	IPCC (2013)
Permafrostområde (PF)	- Minskning av storlek på permafrostområdet (PF ↓)	IPCC (2013)
Havsyttans pH (PH)	- Minskning av den globala havsyttans pH (PH ↓)	IPCC (2013)
Dimma (F)	- Ökning av molnvattenhalten i havsnära dimma (F ↑)	Kawai et al. (2016)
Vattennivå i floder (WL)	- Ökad vattennivåvariation för vissa floder (WL↔)	Úbeda et al. (2013)

3. Metod

I detta arbete granskades 243 forskningsartiklar för att skapa en omfattande lista över risker kring klimatförändringarnas potentiella effekter på broar. De presenterade effekterna identifierades på tre sätt. För det första har några av effekterna identifierats i tidigare litteratur som potentiella klimatrisker, se t.ex. Hultén, Andersson-Sköld, Ottosson, Edstam, & Johansson (2007), Kumar & Imam (2013), Meyer (2008), Schwartz (2010), och Stewart, Wang, & Nguyen (2011). Övriga potentiella effekter identifierades genom att granska dokumenterade fall av brokollaps, skador eller andra fel och undersöka eventuella samband mellan dessa händelser tillsammans med de klimatparametrar som kan antas förändras i framtiden. Slutligen identifierades några effekter baserat på scenarier utifrån hur klimatparametrar som förväntas ändras kan påverka broarnas prestanda och/eller säkerhet. De två sista metoderna för att identifiera klimatpåverkan är i linje med de två metoderna för riskidentifiering beskrivna i Kaplan (1997); dvs identifiera möjliga konsekvenser som kan uppstå och sedan hitta möjliga initierande händelser (metod 2) och identifiera initierande händelser (en förändring i en klimatparameter i vårt fall) och hitta möjliga konsekvenser (metod 1). Metoden som användes för att identifiera de presenterade riskerna visas i Figur 2.



Figur 2. Metod för riskidentifiering.

4. Risker för broar på grund av klimatförändringar

I detta avsnitt presenteras en översyn av de potentiella risker för broar som kan uppkomma som en följd av klimatförändringar. Trots att broar är huvudfokus i denna studie kan de flesta av de nämnda riskerna även påverka andra typer av infrastruktur tillgångar och system. Totalt 31 risker identifieras och diskuteras; de olika riskerna är grupperade i sju huvudkategorier enligt följande:

- Beständighet (riskgrupp D),
- Funktion (riskgrupp S),
- Geoteknik (riskgrupp G),
- Ökad belastning (riskgrupp I),
- Olyckslaster (riskgrupp A),
- Extrema naturhändelser (riskgrupp E)
- Drift (riskgrupp O).

De flesta av de identifierade riskerna ger direkt påverkan på broar som en direkt följd av klimatförändringar, men några påverkar bara broar indirekt, det vill säga det finns även andra yttre faktorer än förändrat klimat som kan påverka; t.ex. riskgrupp A och risk O3. Även om de flesta diskuterade riskerna i värsta fall kan påverka broarnas säkerhet, kommer vissa risker endast påverka funktion och användbarhet (t.ex. risk S1 och risk I5) eller drift (t.ex. riskgrupp O) av broar.

4.1 Riskgrupp D: Beständighetsrisker

Risk D1: Accelererad nedbrytning av överbyggnad

En mycket relevant risk för befintliga broar och infrastruktur i allmänhet är ökad materialnedbrytning och försämring i ett varmare klimat, se t.ex. Kumar och Imam (2013). Förväntade klimatförändringar som högre temperaturer, ökad nederbörd i vissa regioner, ökning av relativ fuktighet i vissa regioner under vissa scenarier, och högre koncentrationer koldioxid i atmosfären bidrar alla till accelererad nedbrytning. Denna observation stöds av ett antal studier (se t.ex. Bastidas-Arteaga et al. 2013; Bastidas-Arteaga & Stewart 2015; Chaves et al. 2016; Köliö et al. 2014; Stewart et al. 2011; Wang

et al. 2012). Exempelvis har Stewart et al. (2011) kvantitativt bedömt risken för korrosionsinitiering och efterföljande skador på betonginfrastruktur under framtida klimatförhållanden i städerna Sydney och Darwin, Australien. En av slutsatserna i denna studie var att en ökning av risken för karboniseringsinducerade skador på över 400 % kan antas år 2100 för vissa regioner i Australien jämfört med idag. En annan studie av Köliö et al. (2014) visar potentiella effekter av högre koldioxidkoncentration och större mängd nederbörd på korrosionsinitiering och varaktigheten av aktiv korrosion (varefter konstruktionen antas ha nått ett förutbestämt gränsvärde) för betongbyggnader i Finland. Resultaten från denna studie visade att både korrosionsinitiering och varaktigheten av aktiv korrosion sannolikt kommer påverkas negativt av klimatförändringarna. T. ex. indikerades att i Lappland är en förändring av sannolik livslängd för betongstrukturer pga. aktiv korrosion från 37,5 år, för klimatet 1980-2009, till endast 19,7 år för det projicerade 2100-klimatet. Som framgår av Bastidas-Arteaga och Stewart (2015) kan dock en reducering i relativ fuktighet, som projiceras för många regioner, ha positiva effekter på nedbrytningen av betongkonstruktioner. Det är rimligt att anta att denna risk för ökad nedbrytning också är relevant för stål och andra metaller. Exempel på tidigare broskador som åtminstone delvis beror på korrosion är Silver Bridge, Ohio, USA 1967 och I-95 över Mianus River Bridge, Connecticut, USA 1983 (Cook et al. 2015; Lichtenstein 1993).

Den möjliga ökningen av solstrålning på vissa ställen ger upphov till risk för en annan nedbrytningstyp, nämligen nedbrytning på grund av ljus, se t.ex. Andrady et al. (2003), Chin et al. (1997) och Kumar och Imam (2013). Enligt Andrady et al. (2003) påverkar en ökning av UV-B-komponenten i solstrålning signifikant risken för ljusinducerade skador av syntetiska och naturligt förekommande material. I denna studie påpekas att plast, gummi och trä är särskilt känsliga för denna risk, men även kompositmaterial är känsliga för nedbrytning som initieras av solstrålning (Chin et al. 1997; Kumar & Imam 2013).

Nedbrytning av biobaserade material kan också påverkas av de projicerade framtida klimatförändringarna (se t.ex. Kumar & Imam 2013; Moncmanová 2007). Tillväxten av organismer som orsakar biologisk nedbrytning främjas av högre temperaturer, högre relativ fuktighet och större nederbörd. Träkonstruktioner är särskilt mottagliga för denna typ av nedbrytning (se t.ex. Shupe et al. 2008). Vidare noterar Moncmanová (2007) att högre atmosfäriska koldioxidkoncentrationer kan öka aktiviteten hos vissa bakterietyper som tar upp kol från koldioxid och producerar energi från ljus. Författaren av studien påpekar att även om betong har ett pH-värde av 11-12,5 när den gjuts, vilket förhindrar tillväxten av bakterier, sjunker betongens pH med tiden för att uppnå ett värde av 9-9,5 vilket ger en mer gynnsam miljö för bakteriell tillväxt. Den ökade mängden atmosfäriskt kol, som är karakteristiskt för det framtida klimatet, kan påskynda denna pH-minskning vilket senare leder till snabbare biologisk nedbrytning. I likhet med biologisk nedbrytning har det också noterats att nedbrytning av träkonstruktioner som härrör från insektsangrepp kan öka på grund av framtida klimatförhållanden, t.ex. kortare och varmare vintrar som ger mindre hårda miljöer för dessa insekter (Schwartz 2010).

Ytterligare relevanta risker inkluderar snabbare försämring av betong- eller stålkonstruktioner som ett resultat av antingen mer frekvent användning av avisningssalt

(Cady & Weyers 1984; Darwin et al. 2008) i regioner där snöfall beräknas öka eller en möjlig ökning av frysnings- och upptiningscykler (Meyer & Weigel, 2011; TRB 2008). När det gäller den senare risken kunde Pakkala et al. (2015) inte notera en betydande ökning av antalet frysnings- och upptiningscykler i södra Finland hittills på grund av klimatförändringen. Trenden kan dock vara olika i andra regioner (Meyer & Weigel 2011; TRB 2008). I Sverige förväntas antal dagar med s.k. nollgenomgångar (då temperaturen pendlar kring noll grader) generellt att minska, utom i delar mellersta och norra Sverige där de kan förväntas öka (SMHI 2019).

Risk D2: Accelererad nedbrytning av underbyggnad

På samma sätt som risken för en snabbare nedbrytning av överbyggnaden kan flera aspekter av det framtida klimatet resultera i en mer aggressiv miljö för bropelare, fundament och grundläggning. De förväntade högre framtida temperaturerna, förändringar i relativ fuktighet, lägre pH-värde i haven (försurning), högre salthalt i marken på vissa ställen och högre koncentrationer av koldioxid i haven och atmosfären, kan alla potentiellt bidra till en mer korrosiv miljö. Omfattningen av detta problem påverkas även av grundvattennivån. I Mallick et al. (1989) står det exempelvis att kemikalier (t.ex. sulfater och klorider) i sitt torra tillstånd inte signifikant ökar risken för nedbrytning av fundament och grundkonstruktioner. Men när dessa kemikalier förekommer i löst form i grundvattnet, förväntas en mycket snabbare nedbrytning. Som en följd av detta ökar en större mängd nederbörd, vilket kan leda till högre grundvattenstånd, ytterligare risken för nedbrytning av fundament och grundkonstruktioner.

Å andra sidan kan en potentiell reduktion i grundvattennivån, eventuellt förekommande i områden med lägre nederbördsmängder och/eller ökande avdunstning, medföra andra negativa effekter på grundkonstruktioner (Toll et al. 2012). Träpålar under grundvattenytan utsätts inte för aeroba förhållanden och är därför inte mottagliga för biologisk nedbrytning. Så snart grundvattnet sänks, blir delen av pålen som är över grundvattenytan utsatt för aeroba förhållanden och biologisk nedbrytning kan börja (Klaassen 2015; Toll et al. 2012). Denna risk är också relevant för stålplåtar; se t.ex. Cheung et al. (1994).

Det kan också nämnas, med tanke på att korrosionshastigheten är störst i stänk- och lågvattenzoner, att underbyggnader i broar i marina miljöer ofta är försedda med extra korrosionsskydd i det område som utsätts för dessa effekter; se t.ex. Corus Construction and Industrial (2005). Denna åtgärd vidtas för att motverka accelererande korrosion i dessa zoner och nå den önskade livslängd för vilken bron är konstruerad. Den förväntade havsnivåhöjningen i framtiden innebär dock att området där underbyggnaden utsätts för stänk och vågskvalp eventuellt kommer att växla uppåt och exponera oskyddade delar till högre korrosionsrisker.

4.2 Riskgrupp S: Funktionsrisker

Risk S1: Värmeinducerad skada på vägbeläggningar och järnvägsräls

Det har hävdats att den uppskattade temperaturhöjningen och mer frekventa värmeböljor kan ha betydande inverkan på både vägbeläggningar och järnvägsräls (Schwartz 2010). Meyer (2008) hänvisar till värmeböljan i Chicago 1995 och skadorna i samband med den som ett exempel. Som rapporterats i Changnon et al. (1996) var den värmeinducerade rörelsen av räls en huvudfaktor till en tågolycka under värmeböljan i Chicago 1995. Gudipudi et al. (2017) studerade effekter av den beräknade framtida temperaturen på vägbeläggningars prestanda i USA. Resultaten i studien indikerar att det är sannolikt med tidigare uppkomna skador i vägbanor i samband med framtida klimatförhållanden än för dagens förhållanden. En annan studie av Anyala et al. (2011) indikerar att de förväntade kumulativa hjulspåren i vägbanor kan tredubblas till 2050 på grund av de projicerade temperaturökningarna. Den beräknade ökningen av nederbörd i vissa regioner kan också påverka denna risk. Hudson (2004) indikerar i en fallstudie för Storbritannien att en ökning av de årliga vägunderhållskostnaderna på så mycket som 60 gånger dagens kostnader är möjlig till 2080-talet på grund av klimatförändringen. För vidare läsning om klimatförändringarnas eventuella effekter på motorvägsbeläggningar, hänvisas läsaren till Jeong et al. (2017), Kumlai et al. (2017), Mallick et al. (2018), Qiao (2015) och Willway et al. (2008).

Risk S2: Risk för ökade långtidsdeformationer

Detta avsnitt behandlar risken för långtidsdeformationer, dvs krypning, vilket inte ska förväxlas med risk för ökade krav på deformationskapacitet som finns beskrivet under risk I4. Det är väl etablerat i litteraturen att en av de faktorer som styr långtidsdeformationer i betong, dvs krypning, är förhållanden i den omgivande miljön. En projicerad lägre relativ fuktighet över land, tillsammans med högre temperaturer, kan ge en högre kryphastighet för betong; se t.ex. Bažant och Panula (1978), England och Ross (1962), Geymayer (1972), Nasser och Neville (1967), Razak (1986) och Vandamme et al. (2013). I en studie av Bažant et al. (2011) noteras att krypproblem är av stor betydelse för broar. Författarna visar att krypning, trots att det huvudsakligen är ett problem i funktionsstadiet, även kan ge allvarliga konsekvenser. Som ett exempel citerade författarna kollapsen av Koror-Babeldaob-bron i Palau 1996 (en segmentbyggd förspänd lådbro med ett världsrekordspann på 241 m) som sägs ha inträffat till följd av extraordinär krypning. Felet i denna bro uppmärksammar ytterligare en potentiell risk, nämligen möjlig förlust av förspänningskraft (risk I8). Mätningar visade att denna bro i genomsnitt hade 50% förlust av förspänning på grund av extraordinära deformationer (Bažant et al., 2011). I denna studie rapporteras 56 andra broar som också uppvisat liknande extraordinära krypdeformationer och det nämns att många fler sannolikt existerar.

Trä är också utsatt för kryppproblem och den högre framtida temperaturen kommer, i likhet med betong, sannolikt att bidra till en snabbare krypning. Kryp beteendet i trä påverkas dock även till stor del av fukthalten, en högre fukthalt leder till större krypning och vice versa; se till exempel Carll och Wiedenhoef (2009). Med tanke på att fukttinnehållet ökar med lägre temperaturer och högre relativ fuktighet (t.ex. Carll & Wiedenhoef, 2009) kan de framtida klimatförhållandena resultera i ökad eller minskad träfukthalt beroende på plats. Ett annat beteende som skiljer trä från andra material är relaterat till mekanosorptiva effekten; se t.ex. Holzer et al. (1989) och Mårtensson (1994). Träkonstruktioner uppvisar avsevärt högre deformationer vid samma spänningsnivå om de utsätts för mer frekvent och/eller högre grad av cyklisk uppfuktning och uttorkning. Därför ökar förändringar i relativ fuktighet risken för extraordinära deformationer, vilket kan leda till problem under laster som är betydligt lägre än den ursprungliga lasten vid dimensionering (Honfi 2013). Den högre säsongsvariationen i nederbörd för vissa regioner, som projiceras i IPCCs AR5, kan antagligen medföra en större variation i relativ fuktighet. På samma sätt som förlusten av förspänning i förspända betongelement är spänningslaminerade brobanor i trä, vilka huvudsakligen hålls samman av förspänningskrafter som förbinder trälaminaat, också känsliga för förlust av förspänningskrafter på grund av temperaturförändringar och variationer i fukttinnehåll (Bell, 2008).

4.3 Riskgrupp G: Geotekniska risker

Risk G1: Högre erosionshastigheter

Erosion har upprepade gånger visat sig vara en av de vanligaste orsakerna till brokollaps. Cook et al. (2015) undersökte broskador från New York State Department of Transportation (NYSDOT)-databas för perioden 1987-2011 och fann att erosion var en av de vanligaste orsakerna till kollaps. Många andra studier bekräftar denna slutsats; se t.ex. Arneson et al. (2012), Briaud et al. (2007), Briaud et al. (2014), Flint et al. (2017), Kattell och Eriksson (1998), Stein et al. (1999), Stein och Sedmera (2006), och Taricka (2014). Flera empiriska ekvationer för att beräkna erosionsdjup finns; se t.ex. Deng och Cai (2010). Dessa empiriska ekvationer kopplar ofta erosionsdjup till vattendjup, flödes hastighet och vattnets kinematiska viskositet; se t.ex. Froehlich (1989), Neil (1964) och Shen et al. (1969). Enligt dessa ekvationer är högre erosionshastigheter förknippade med högre flödesdjup, högre flödes hastigheter och lägre kinematisk viskositet.

Med tanke på klimatförändringarna är ökad erosion sannolik på grund av flera orsaker (RSS 2003; DoT 2005; TRB 2008 ; Kumar & Imam 2013). Arnell och Gosling (2013) studerade klimatförändringarnas effekter på avrinningsområden på global skala. I sin studie drog de slutsatsen att över 47 procent av världens markytor förväntas få betydligt högre genomsnittlig årlig avrinning. Som ett resultat förväntas högre flödes hastigheter, vilket resulterar i en väsentlig ökning av erosionshastigheter. En annan lokal faktor som kan leda till högre flödes hastigheter är den extra avrinningen från smältande permafrost på platser där sådan finns idag. På grund av havsnivåhöjning och ökning i nederbörd kan

dessutom högre framtida flödesdjup och/eller flödes hastigheter fås som leder till snabbare erosionshastigheter på många platser. Dessutom resulterar ett varmare framtida klimat i en minskning av den kinematiska viskositeten hos vatten och därför kan erosionsrisken ökas ytterligare. Dessa faktorer i det framtida klimatet kan påverka den lokala erosionen kring bropelare och fundament samt den allmänna erosionen av flodbädden vid bron. Flera nya studier har behandlat klimatförändringarnas inverkan på denna risk, se t.ex. Dikanski et al. (2016), Dikanski et al. (2018) och Kallias och Imam (2016).

Risk G2 och risk G3: Högre risk för kollaps av omgivande broslänter och högre risk för jordskred

På grund av liknande bakomliggande orsaker diskuteras i detta avsnitt både risken för kollaps av omgivande slänter och för jordskred. Dessa presenteras dock som två separata risker, eftersom de kan få helt olika konsekvenser. Det är väletablerat att en av de viktigaste orsakerna till kollaps av omgivande slänter och jordskred är intensiva regn, se t.ex. Chen et al. (2004). Kristo et al. (2017) studerade effekten av variationer i nederbördsintensitet på släntstabiliteten i Singapore och observerade en signifikant minskning av stabiliteten hos slänter på grund av den projicerade mer frekventa intensiva nederbörden, särskilt under första hälften av seklet.

I Hultén et al. (2007) bedömdes effekten av ökad nederbörd på risken för släntkollaps för två fallstudieområden i Sverige; en i sydväst, Göta Älv-dalen, och en i norr, Krokvgå. Det drogs slutsatsen att för alla typer av slänter i de studerade områdena kan en minskad stabilitet förväntas. Flera andra studier visar också att klimatförändringen påverkar släntstabiliteten negativt och leder potentiellt till mer frekventa jordskred (Ciabatta et al. 2016; Komori et al. 2018; Robinson et al. 2017). Det bör dock påpekas att resultaten i vissa studier (t.ex. Wu et al. 2016) ger andra slutsatser gällande den ovan nämnda risken för ökad frekvens av jordskred som följd av klimatförändringar som motsäger det som skrivits här.

Det finns också andra aspekter av det projicerade framtida klimatet som kan påverka stabiliteten i slänter och förekomsten av jordskred. Till exempel kan potentiell utrotning av vissa vegetationsarter på grund av förhöjd framtida temperatur ytterligare äventyra stabiliteten i slänterna. Detta beror på förlusten av bidraget till släntstabilitet som dessa växter bidrar med (Chok et al. 2004; Wu et al. 1979). Dessutom kan förändringar av vindklimat och snabbare vattenflöden, som diskuteras under rubrik G1, resultera i en snabbare erosionsgrad av sidoslänter och följaktligen öka risken ytterligare.

Risk G4: Högre risk för sättningar

En ökning av grundvattennivån på grund av ökning av nederbörd eller minskning på grund av minskad nederbörd kan uppkomma på grund av de förväntade förändringarna i framtida nederbördsmönster. Såsom diskuterats i Toll et al. (2012) kan båda förändringarna i grundvattennivå öka ett antal sättningsrelaterade risker. En ökning av de effektiva spänningarna i marken är ett direkt resultat av en sänkning av grundvattennivån

på grund av en relaterad minskning av porvattentrycket. Därför är en högre konsolideringsgrad, som ett resultat av denna ökning av effektiva spänningar, ett förväntat utfall. Å andra sidan ökar en ökning av grundvattennivån risken för sättning som kan leda till kollaps, då vissa jordar hålls samman av krafter mellan partiklarna som försvinner vid kontakt med vatten. Det kan innebära en hastig försämring av jordens hållfasthet och leda till hastig kollaps av marken. Ökning av grundvattennivån kan även öka fuktinnehållet i lerjord som även det kan medföra ökade sättningar, dessutom kan bildandet av sjunkhål för jordar i karstiska förhållanden påverkas av klimatförändringar. Grottor bildas när lösliga bergarter, t.ex. kalksten och dolomit, löses upp på grund av grundvattenflödet. Så länge dessa grottor är fulla av vatten är de försedda med ett stöd som förhindrar kollaps. Men när grundvattennivån faller, rasar dessa grottor samman och bildar sjunkhål, vilket kan påverka alla konstruktioner i området. Med tanke på projicerad högre variation i nederbörd mellan olika årstider i vissa regioner, och de starkare årstidsvariationerna i grundvattennivå det kan medföra, är denna risk av stor betydelse. Slutligen ökar avsmältningen av permafrost på grund av temperaturökningen också risken för sättningar för broar i sådana områden (Meyer, 2008).

Risk G5: Högre risker för bergskred, flöden av skräp och snöskred

På samma sätt som riskerna för släntstabilitet och jordskred går det att förutspå ökade risker för bergskred, flöden av skräp och snöskred. se t.ex. Collins och Stock (2016), Harri et al. (2009) och Stoffel et al. (2014). Utöver de bakomliggande orsaker som nämnts för riskerna G2 och G3 kan smält permafrost ge upphov till mindre stabila bergskedjor och orsaka flöden av skräp (Stoffel et al. 2014). Dessutom kan de högre framtida temperaturerna också utlösa bergskred (Collins & Stock 2016) och öka risken för laviner (Harris et al. 2009). För vidare läsning om risken för massrörelser på grund av klimatförändringar, se t.ex. Gruber et al. (2004), Harris et al. (2009), Stoffel och Huggel (2012) och Stoffel et al. (2014). Ett exempel på en bro med en allvarlig risk för bergskred är bron vid Glenwood Canyon, Colorado, USA, på I-70-motorvägen, där stora bergskred skedde 2005, 2010 och 2016. Det är värt att notera att skredet 2010 slog hål i brobanan. Ett annat exempel är Chediguan Bridge, Kina (He et al. 2018), där ett jordbävningensutlöst bergskred i maj 2008 förstörde bron. Den byggdes sedan om och återupptogs för trafik nästan ett år efter händelsen. I juli 2009, bara två månader efter att ha öppnats igen, blev bron återigen förstörd på grund av ett bergskred som utlöstes av nederbörd. Vägbron Ri di Rialp i de schweiziska Alperna, som kollapsade under en lavin 1998, visar tydligt hur stora konsekvenser som kan fås av en lavin, där Margreth och Ammann (2004) ger fördjupad information om denna händelse.

Risk G6: Högre risk för jordförvätskning

Jordförvätskning är en av huvudorsakerna till skador på broar under jordbävningar (t.ex. Youd 1993) och innebär att vattenmättad jord under en jordbävning förlorar sin styvhet och bärighet och istället beter sig som en vätska. Kollapsen av Showa-bron i Niigata jordbävningen 1964 i Japan är ofta citerat som ett klassiskt exempel; se t.ex. Youd (1993).

Flera studier (t.ex. Nath et al. 2014; Nath et al. 2018; Obermeier 1996; Yilmaz & Bagci 2006) visar att högre grundvattennivå är förknippad med högre förvätskningsrisk under en jordbävning, där en högre grundvattennivå är en möjlig konsekvens på vissa platser av klimatförändringar. Dessutom hävdas i vissa studier (t.ex. Ekström et al. 2006; Hampel et al. 2010; McGuire 2012; Usman 2016) att klimatförändringar kan öka själva jordbävningens frekvens, medan andra studier motsäger detta påstående (Hoeppe 2016).

Risk G7: Extra belastning på pålar som kan leda till överbelastning

De förväntade framtida klimatförändringarna kan resultera i ytterligare belastning på pålgrundläggningar (Toll et al. 2012). Författarna ger två möjliga orsaker till dessa ökade belastningar. För det första, om jorden som omger en påle sjunker ihop, se G4, uppkommer en nedåtriktad dragkraft på pålen på grund av friktionen mellan dess mantelyta och den omgivande jorden, vilket potentiellt kan överbelasta pålarna och orsaka kollaps. För det andra kan en grundvattensänkning på grund av minskad nederbörd leda till reducerad flytkraft och ytterligare överbelasta pålarna.

Risk G8: Skador på grund av krympning och svällning av lera

Krympning och svällning av leror under respektive torra och våta årstider har rapporterats som en vanlig orsak till skador på byggnader (Crilly 2001; Sanders & Phillipson 2003; Toll et al. 2012). Till exempel var över 1,6 miljarder kronor i ekonomiska förluster kopplade till lerkrympnings/svällningsrörelser under 1990-talets perioder av torka i Storbritannien. På samma sätt som byggnader är broar också mottagliga för denna risk. Den projicerade ökningen av årstidsvariationer i nederbörd samt högre framtida temperaturer som leder till ytterligare avdunstning kan öka effekten av torknings- och vätningscyklerna, vilket leder till mer allvarliga krympnings och svällningsskador (Capon & Oakley 2012; Toll et al. 2012). Förekomsten av krympnings/svällningsskador har fördubblats i Frankrike under perioden 1989-2002 jämfört med 1961-1990, vilket ytterligare visar på effekter av ett ändrat klimat (Corti et al. 2009).

4.4 Riskgrupp I: Ökad belastning

Risk I1: Högre vågpåverkan på pelare och fundament

I IPCC-rapporten (2013) beräknas flera faktorer i det framtida klimatet, framför allt högre vindhastigheter i vissa regioner, öka frekvensen av och höjden hos extrema vågor. Med tanke på att vågpåverkan är en viktig parameter vid konstruktion av brokomponenter, t.ex. pelare och fundament (Meyer 2008), kan denna ökning av extrema vågor påverka broarnas säkerhet.

Risk I2: Högre vindlaster

De projicerade högre framtida vindhastigheterna på vissa platser utgör ett allvarligt hot mot vår byggda miljö i allmänhet och broar i synnerhet (Meyer 2008). Effekten av vind på broar beskrivs av ett antal mekanismer; nämligen statisk vindlast, vindpustar, virvelbildning, vibrationer, etc. (Nikitas 2011). Trots att kollapsen av Tacoma Narrows Bridge, Washington, 1940, ledde till intensiv forskning om vindinducerade laster är verkningssättet för många av dessa mekanismer fortfarande inte fullt förklarat. Det intuitiva antagandet att högre vindhastighet motsvarar högre laster på broar är emellertid i allmänhet sant för många av dessa mekanismer, se t.ex. Nikitas (2011). I Seo och Caracoglia (2015) har det visat sig att högre vindhastigheter kan påverka risken för vibrationer i långa broar. I en annan relevant studie, undersökte Ryan et al. (2016) effekten av klimatförändringar på brott relaterade till vindlast på trästolpar i elnätet. Under ett högemissionsscenario förväntas en ökning av brott relaterade till vindlaster med ungefär en 60% i Brisbane, Australien för perioden fram till 2070. Ett antal andra studier har också utvärderat effekten av klimatförändringar för denna risk; se till exempel Mudd et al. (2014a, 2014b), Rosowsky (2018) och Salman et al. (2017).

Risk I3: Högre snölaster på täckta broar

Den beräknade ökningen i snöfallintensitet på vissa ställen kan ge ökad risk för skador på täckta broar. Många täckta broar är fortfarande i drift, t.ex. Hartland Bridge i Hartland; New Brunswick; Kanada och Holzbrücke Bad Säckingen-bron som förbinder Tyskland och Schweiz. Även om de flesta täckta broar idag endast är öppna för fotgängare, används vissa fortfarande som trafikbroar, t.ex. Conwy Railway Bridge, North Wales, Storbritannien.

Risk I4: Högre risk för termiskt inducerade spänningar

De projicerade temperaturförändringarna i det framtida klimatet kan leda till ökade krav på deformationskapacitet i broar och potentiellt öka de termiska spänningar som kan uppkomma vid för låg kapacitet (Holper et al. 2007; Karl et al. 2009; Schwartz 2010; TRB 2008). Denna risk exemplifieras av t.ex. DuSable Bridge, Chicago, USA. Under värmeböljan i juli 2018 kunde denna öppningsbara bro inte öppna för passerande båtar i Chicagofloden då öppningsmekanismen fastnat på grund av att delarna expanderat av hög värme. Ett annat exempel ges av Hejnic (1988) som fann att dragspänningarna på grund av temperaturgradienter var större än de som berodde på hela belastningen från trafik för Klement Gottwaldbron i Prag, Tjeckien. Vidare kan en eventuell ökning i solstrålning på vissa platser öka temperaturgradienten mellan toppen och botten av brobanan och resultera i spänningsökningar, även om detta inte är ett troligt scenario (Larsson 2015).

Risk I5: Ökade krav på dräneringskapacitet

Den beräknade ökningen av nederbörd på vissa platser kommer att öka kraven på, och eventuellt översvämma, dräneringssystemet för broar. Denna risk är relevant för hela stadsavloppssystemet och är inte bara angeläget för broar. se t.ex. Berggren (2007) och Olofsson (2007).

Risk I6: Högre hydrostatiskt tryck bakom landfästen

Som tidigare diskuteras beräknas nederbörden öka på många platser i framtiden. Meyer (2008) konstaterar att denna ökning av nederbörd kan resultera i en högre grundvattennivå på dessa platser vilket leder till ytterligare hydrostatiskt tryck bakom landfästen i broar.

Risk I7: Ökad belastning på broar med styrluckor

Översvämningsskydd, t.ex. Morganza spillway i Louisiana, USA (se t.ex. Balaguru & Gopu 2016; Rupnow 2010), och flödesstyrningskonstruktioner för bevattningsändamål, t.ex. Chamravattom regulatorbron och Koottayi regulatorbron i Kerala, Indien (se t.ex. Abdul Hakkim et al. 2013; Ajith & James 2016), är ibland utformade för att även fungera som motorvägs- eller järnvägsbroar. Ökad nederbörd och havsnivåhöjning kommer att öka vattennivån som dessa konstruktioner behöver hantera och som ett resultat kommer ytterligare belastningar på pelarna och brobanorna att uppkomma. Denna risk är också relevant för andra hydrauliska konstruktioner, se t.ex. Ankum (2002), Chanson (2004), Novak et al. (2014) och Zevenbergen et al. (2012).

Risk I8: Ökade spänningar på grund av snabbare förlust av förspänningskraft

Förspänningsförluster uppdelas i omedelbara förluster och tidsberoende förluster. Två huvudkomponenter i den tidsberoende förlusten av förspänningskraft är de som relaterar till krypning och krympning, se t.ex. Aalami (1998), Hernandez och Gamble (1975) och Zia et al. (1979). Som diskuteras i risk S2 kan flera framtida klimatförändringar leda till ökad krypning och därmed ökade spänningsförluster. Spänningsförlusterna kan även öka pga. den projicerade lägre relativa fuktigheten vilket ger en ökad krympning (t.ex. Aalami 1998; Bažant & Baweja 1995; Hernandez & Gamble 1975; Zia et al. 1979).

Risk I9: Högre belastning på grund av isbildning

Is påverkar broar, som ligger i miljöer som omges av istäcke, på flera sätt, se t.ex. Beltaos et al. (2003), Fransson (1988) och US Army Corps of Engineers (2006). För det första orsakar temperaturförändringar i istäcket termisk isexpansion eller kontraktion som utövar ett sidotryck på bropelare (Fransson 1988). Flera broar har skadats av termiskt istryck, t.ex. bron vid Kusforsen i Skelleftefloden, Sverige 1980 (Fransson 1988). Vertikala krafter på bropelare kan också bero på istäckets vertikala rörelser på grund av

variationer i vattennivå (US Army Corps of Engineers 2006). Dessutom kan den dynamiska kraften från isflaxkollision med bropelare, som är beroende av flödes hastighet och isens hållfasthet (Beltaos et al. 2003), bli betydande efter islossning. Slutligen kan isåsar under broar pålägga tryck på bropelarna, skada brobanan; till exempel smekmånadsbron över Niagara-floden, Ontario, Kanada 1936 och Perth-Andoverbron över Saint John River, New Brunswick, Kanada 1987; öka erosions hastigheten under bropelarna, eller till och med orsaka allvarliga översvämningar (Beltaos et al. 2003).

Klimatförändringarna kan påtagligt påverka förekomsten av is i floder (Beltaos 2004) och följaktligen påverka omfattningen av de nämnda effekterna. En högre temperaturvariation mellan årstider, som projiceras i vissa studier på vissa platser (se t.ex. Imada et al. 2017), kan öka risken för termiskt istryck. Ökning i vattennivåfluktuationer, som indikeras i vissa floder, se t.ex. Úbeda et al. (2013), kan också öka de vertikala krafterna på bropelare. Dessutom kan mer allvarliga isblockeringar antas på grund av högre temperaturer och nederbörd i framtiden. Som exempel hävdar Beltaos och Burrell (2003) och Beltaos (2004) att klimatförändringar kan leda till mer frekventa och allvarligare isblockeringar under vår- och midvinter i många kanadensiska floder. Å andra sidan kan klimatförändringarna ge en lägre dynamisk påverkan från isflöden, eftersom de högre framtida temperaturerna kan orsaka en reducering i istjocklek (Prowse et al. 2011) och hållfasthet (US Army Corps of Engineers, 2006).

4.5 Riskgrupp A: Olycksrelaterade risker

Risk A1: Högre risk för fartygskollisioner

Det är väl etablerat att högre vattenhalt ger sämre sikt under dimma (Houghton & Radford 1938), vilket understryks i senare studier, se t.ex. Wu et al. (2007). Under den projicerade framtida uppvärmningen förväntas vattenhalten öka i havsnära dimma (Kawai et al. 2016), vilket kan ge en högre risk för fartygskollisioner med broar. Qu et al (2015) hävdar att klimatförändringen åtminstone delvis är ansvarig för den observerade minskningen i sikt under vintern i östra Kina. De projicerade högre framtida vågorna på vissa ställen, som diskuteras i risk II, kan leda till svårare navigering och ytterligare öka denna risk. Händelsen vid Almöbron i Sverige 1980, där bron kollapsade på grund av en fartygskollision, illustrerar denna risk. Ett annat exempel, som också skedde 1980, är kollapsen av en 396 m sektion av Sunshine Skyway Bridge, Florida, USA, på grund av fartygskollision (Cook et al. 2015; Wuttrich et al. 2001).

Risk A2, risk A3 och risk A4: Högre risk för kollisioner bil-bropelare, tåg-bropelare, samt trafikolyckor

På samma sätt som för risk A1 ökar den reducerade synligheten under dimma risken för kollisioner mellan fordon och bropelare. Vidare leder den beräknade ökningen av nederbörd på vissa platser till halare vägar och ökar ytterligare risken för denna typ av

olyckor. Dessa två klimatfaktorer kan också leda till ökad risk för andra trafikolyckor. Även om denna risk vid första anblicken kan tyckas obetydlig, gör frekventare olyckor och kollisioner med bropelare att risken ökar för broskador på grund av brand som kan härröra från dessa olyckor. Enligt Woodworth (2013) är risken för exponering för brand vid en bro starkt beroende av sannolikheten för att fordonsolyckor ska äga rum vid bron. Slutligen kan en högre risk för skador på vägbeläggningar och järnvägsräls, som diskuteras i risk S1, öka förekomsten av tågurspårningar och därigenom öka risken för kollisioner mellan tåg och bropelare. För mer om probabilistisk analys av kollisioner mellan tåg/fordon och bropelare, se Björnsson (2015).

4.6 Riskgrupp E: Extrema naturhändelser (naturkatastrofer)

Risk E1: Ökning av intensitet hos och/eller frekvens av översvämningar

Översvämningar är ett av de mest skadliga naturliga hoten för infrastruktur inklusive broar, där bl.a. Jevrejeva et al. (2018) hävdar att en möjlig ökning av intensiteten och frekvensen av översvämningar är en av de mest kostnadsdrivande effekterna av klimatförändringar. Flera studier (t.ex. Batchabani et al. 2016; GDV 2011; Hoeppe 2015), konstaterar att en betydande ökning av risken för översvämning under de framtida klimatförhållandena är sannolik. I GDV (2011) står det exempelvis att en översvämning som för närvarande har en 50 års återkomsttid (sannolikhet att inträffa 1 gång under 50 år) får en återkomsttid på 20 år inom de närmaste 30 åren. Den projicerade havsnivåhöjningen och ökad nederbörd kan samverka och orsaka högre och mer frekventa översvämningar. I Världsbanken (2012) hävdas att den beräknade minskningen av havets pH-värde, ökning av havstemperaturen och ökning av intensitet och frekvens av tropiska cykloner kan påverka korallrevens tillväxt negativt; rev som naturligt minskar effekterna av översvämningar. Beck et al. (2018) visar att de årliga förväntade skadorna från översvämningar skulle fördubblas utan korallrev. Som ett exempel på hur förödande effekterna av framtida översvämningar kan vara för broar, studerade Batchabani et al. (2016) effekten av klimatförändringar på översvämningarnivåerna i Riviere Des Prairies Basin; Quebec; Kanada och fann att översvämningarnivåerna för perioden 2040-2060 är så höga att två broar i det studerade området kommer att bli helt översvämmade.

Förutom att förvärra risken för översvämning kan havsnivåhöjning också bidra till andra risker för befintliga och framtida broar liksom annan infrastruktur, se t.ex., Meyer och Weigel (2011), Mondoro et al. (2018) och TRB (2008). Mondoro et al. (2018) uppmärksammar möjligheten att många kustbroar, trots att de inte översvämmas av vatten, kan bli oanvändbara till följd av permanent nedläggning av vägar i kustzoner. Gornitz et al. (2002), McInnes et al. (2003) och Titus och Richman (2001) är exempel på andra studier som behandlar de potentiella effekterna av havsnivåhöjning.

Risk E2: Ökning av intensitet hos och/eller frekvens av stormar och stormfloder

IPCC (2013) hävdar att det är nästan säkert, det vill säga mer än 99% sannolikhet, att förekomsten av intensiva tropiska cykloner har ökat över Nordatlanten sedan 1970-talet och att det är mer sannolikt än inte, mer än 50% sannolikhet, att ytterligare ökning kommer att observeras i framtiden. Schwartz (2010) hävdar att en stormhändelse som hade en 100 års återkomsttid kan få en återkomsttid på endast 20 år.

Stormars förödande effekter på broar har upprepade gånger rapporterats. Under orkanen Katrina 2005 var upplyftning och förflyttning av brobanor på grund av stormfloder en av de viktigaste observerade förstörelserna (Meyer 2008; Padgett et al. 2008). Förutom starkare och mer frekventa stormar förvärrar den högre startnivå som fås av havsnivåhöjning och projicerade högre vågor ytterligare denna risk för stormfloder.

Risk E3: Ökning av intensitet hos och/eller frekvens av bränder

En avsevärd ökning av frekvensen av och/eller intensiteten hos bränder på vissa platser kan förväntas vid en framtida högre temperatur och minskad nederbörd; se t.ex. Kerr et al. (2018), Lozano et al. (2017), Song och Lee (2017), Strydom och Savage (2017) och Stambaugh et al. (2018). Denna ökning ger broar och annan infrastruktur i närheten en ökad risk för skador. Skadan på Royal Gorge Bridge, Colorado, USA under skogsbranden 2013 exemplifierar denna risk. En annan händelse som antagligen kan hänföras till bränder är kollapsen av järnvägsbron i San Saba, Texas, USA, 2013 (Brun et al. 2014). Förutom förändringar i temperatur och nederbörd kan de projicerade högre vindhastigheterna på vissa platser ytterligare förvärra denna risk genom att öka eldspridningen (Song & Lee 2017).

4.7 Riskgrupp O: Drift

Risk O1: Ytterligare driftskostnader för snöborttagning

En beräknad ökning av snöfall på vissa platser kan leda till en ökning av kostnaderna för snöborttagning eller till och med öka förekomsten av broblockeringar. Generellt är det dock sannolikt med en reducerad snömängd på de flesta platser, vilket kan leda till en minskning av sådana kostnader, se t.ex. Karl et al. (2009) och TRB (2008).

Risk O2: Mer frekventa tillfälliga brobegränsningar

Om upprepade höga vindhastigheter observeras under en längre tid, t ex 10-15 minuter, tillämpas restriktioner för vilka fordon får köra över vissa broar. Dessa begränsningar orsakar omvägar för vissa fordon och resulterar i ytterligare användarkostnader. Med tanke på att högre vindhastigheter projiceras för vissa platser i framtiden kan frekventare

brorestriktioner förväntas. Dessutom, om klimatförändringar ökar istillförseln på bropelarna, kan det förekomma mer frekventa avstängningar (Kleissl & Georgakis, 2010). Exempelvis rapporterar Kleissl och Georgakis (2010) att Øresundsbron som förbinder Danmark och Sverige fick stängas 5 gånger mellan åren 2001 och 2010 på grund av anhopning av is. Liknande observationer har noterats för andra nordeuropeiska broar (Kleissl & Georgakis, 2010). Sådana brorestriktioner kan dock minska på vissa ställen på grund av att några av de projicerade klimatförändringarna, t.ex. minskad vindhastighet eller varmare förhållanden, minskar risken för istillväxt.

Risk O3: Ökad risk för elbrist

Flera faktorer i det projicerade framtida klimatet kan äventyra tillgången på elenergi. Vindkraft kan påverkas av förändringar i vindhastigheter och, för vissa områden som Skandinavien, atmosfärisk isbildning (Mideksa & Kallbekken 2010). Carvalho et al. (2017), Davy et al. (2018), Gonçalves-Ageitos et al. (2015) och Soares et al. (2017) förutspår en minskning av vindkraftsproduktionen under vissa årtider i vissa regioner. De högre framtida temperaturerna förväntas minska elproduktionen från värmekraftverk på grund av uppvärmt kylvatten från floder etc. (Mideksa & Kallbekken 2010). Minskningen i nederbörd på vissa ställen, åtföljd av ökad avdunstning på grund av de högre temperaturerna kan påverka elenergiproduktion från vattenkraftverk negativt. Dessutom är fler strömavbrott förväntade på grund av ökad frekvens av extrema händelser, t.ex. stormar.

Denna ökade risk för elavbrott kan på många sätt påverka broar och annan infrastruktur. De flesta tåg är beroende av el för driften och därför påverkas utnyttjandet av järnvägsbroar. Avstängda trafik- och vägljus kan hindra eller förändra trafikflödet på motorvägarna. Funktionen hos rörliga broar är också beroende av elkraft. Slutligen påverkas även driften av system för övervakning av broars tillstånd av strömavbrott. En detaljerad undersökning av konsekvenserna av strömavbrott för olika typer av infrastruktur presenteras i Petermann et al. (2011).

4.8 Samverkande risker

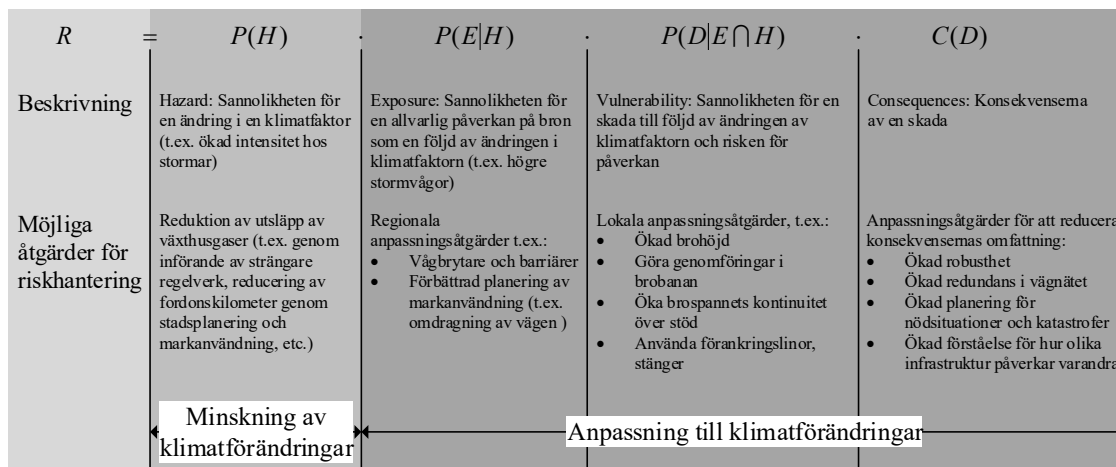
Sällan kan en enda orsak identifieras som den enda anledningen till problem med en bro. Skador som uppstår händer ofta på grund av en kombination av flera faktorer som går fel samtidigt (Hong et al. 2012). Det är därför viktigt att även se de tidigare nämnda riskerna ur ett helhetsperspektiv och inte endast isolerade. Till exempel kan ett ökade hydrostatiskt tryck bakom brofundament, risk I6, kombinerat med risken för accelererade erosionshastigheter, risk G1 och beständighetsriskerna, riskgrupp D, ge en stor kombinerad risk för skador.

Vidare är några av de tidigare nämnda riskerna beroende av varandra, dvs förekomsten av en risk kan påverka storleken av en annan risk. Exempelvis kan förekomsten av ett jordskred, risk G3, leda till att rörelsefogar i broar i närheten täpps igen och därigenom

förvärras risken för termiskt inducerade spänningar, risk I4. Detta kan belysas av fallet Deer Creek Bridge, Saskatchewan, Kanada (Kelly et al. 1995; Toll et al., 2012). På grund av ett jordskred observerades en 13-80 mm stängning av brobanans rörelsefogar och en ökad risk för termiskt inducerade spänningar. Ett annat exempel på samverkande risker är att om kollapssättningar sker i en region blir denna region mer mottaglig för översvämning (Charles and Watts, 1996; Toll et al., 2012). Vidare orsakar bränder i en region bildandet av ett vattenavvisande jordskikt under jordytan och förstörelse av vegetationens rötter, vilket ökar ytavrinningen. Följaktligen ökar risken för störtfloder, flöden av skräp och jordskred efter en brandbekämpning, se t. ex. Cannon and DeGraff (2009), Elliott och Parker (2001), Kean, Staley och Cannon (2011), Moody och Martin (2001), Neary, Gottfried och Ffolliott (2003) och Shakesby and Doer (2006). Som ett exempel citerar Elliott och Parker (2001) de översvämningar som följde efter skogsbranden i Buffalo Creek, Colorado, USA, maj 1996. Slutligen ökar risken för erosion under en översvämningshändelse, kallad tryckflödeserosion. Många andra sådana relationer mellan de identifierade riskerna kan existera, det gäller därför att vara uppmärksam på att en händelse kan förvärras i kombination med andra även om de inte i sig är allvarliga.

5. Möjliga anpassningsåtgärder

Såsom har diskuterats i föregående avsnitt kan klimatförändringar medföra betydande effekter på broar. Åtgärder kan och bör därmed vidtas för att minska sannolikheten för och/eller konsekvenserna av sådana effekter. Risken för effekter från klimatförändringar kan delas upp och beskrivas som i Figur 3 (Nasr et al. 2019). Som framgår av figur 3 kan klimatpåverkan behandlas på två generella sätt, begränsning och anpassning. För det första kan minskning av växthusgasutsläpp, genom att t.ex. minska fordonskilometer för resor (VMT) eller genom markanvändning och stadsplaneringsstrategier (se t.ex. Hamin & Gurrán, 2009), avsevärt minska de potentiella effekterna av klimatförändringen. Men Füssel (2007) ger flera argument om varför enbart begränsning är otillräcklig och omedelbara anpassningsåtgärder är i många fall nödvändiga. Till följd av klimatsystemets tröghet förväntas till exempel en väsentlig ökning i klimatförändringar under de kommande årtiondena oberoende av utsläppscenario (Füssel, 2007). Till skillnad från minskningsåtgärder är anpassningsåtgärder inte heller beroende av andras länders handlingar och kan ge direkta fördelar på regional och lokal nivå.



Figur 3. Olika sätt att hantera risker från klimatförändringar.

Ur ett svenskt perspektiv har Trafikverket redan utvecklat en klimatanpassningsstrategi som ger en lista över allmänna aktiviteter för anpassning till ett förändrat klimat. Dessa aktiviteter innefattar till exempel att anpassa ny och befintlig infrastruktur och utveckla metoder för att bestämma när och var sådana anpassningar skulle vara kostnadseffektiva (Liljegren 2016). Flera fall där anpassningsåtgärder redan har genomförts existerar; till följd av stormen Gudrun uppfördes till exempel trädfria zoner på högprioriterade delar av järnvägsnätet för att förhindra blockering av järnvägar av fallna träd under framtida stormar (Lindgren, Jonsson & Carlsson-Kanyama 2009). Men enligt Lindgren, Jonsson, och Carlsson-Kanyama (2009) är det oklart om detta gjordes med avsikt att anpassa sig

till framtida klimatförändringar eller inte. Andra fall av klimatförändring i Sverige finns på den svenska klimatförändringsportalen (<http://www.klimatanpassning.se>).

Framtida broar kan anpassas till klimatförändringar på flera sätt. Exempelvis beskriver Auld et al. (2010), Connor et al. (2013), Gibbs (2012), Mondoro, Frangopol och Liu (2018), och Pietro et al. (2016) bland många andra behovet av att regelbundet uppdatera dimensioneringsregler och standarder för att möta ett förändrat klimat. Exempel på uppdateringar av regler och standarder som svar på klimatförändringar finns redan; t.ex. införandet av justeringsfaktorer för dimensionerande flöde och dimensionerande regn i flera europeiska standarder (Madsen et al. 2014) och införandet av en osäkerhetsfaktor för cykloner i australiensiska standarder (Connor et al. 2013). Det är värt att notera att denna anpassningsåtgärd i att regelbundet uppdatera regler och standarder har kategoriserats som en säker anpassningsstrategi (Auld, MacIver & Klaassen, 2006), som anses vara robust oavsett det framtida klimatscenarioet och därför bör genomföras utan dröjsmål enligt författarna. Begränsad markanvändning, t.ex. genom ökade försäkringskostnader i farliga kustzoner (FHWA 2009; TRB 2008), har också identifierats som en säker anpassningsstrategi (Hallegatte 2009). Vidare har utvecklingen av nya material och/eller teknologier som är mer motståndskraftiga mot klimatpåverkan (t.ex. utveckling av nya värmebeständiga beläggingsmaterial (FHWA 2009; TRB 2008)) nämnts i litteraturen som en möjlig anpassningsteknik. En annan viktig aspekt för att anpassa framtida broar till klimatförändringar är att välja konstruktioner som är flexibla för eventuella anpassningar som i framtiden kan behövas för att förbättra transportinfrastrukturen.

Flera åtgärder för att anpassa befintliga broar till klimatförändringar har angetts i den genomgångna litteraturen. Stewart, Wang och Nguyen (2012) nämner att öka betongtjockleken, användning av skyddande ytbeläggningar, galvaniserad armering, korrosionshämmare, elektrokemisk kloriduttag eller katodiskt skydd som möjliga anpassningstekniker för att reducera en potentiell ökning av korrosionsskador på betonginfrastruktur som ett resultat av klimatförändringar. Mondoro et al. (2018) föreslår användning av släntbeklädning av sten, betongbockssystem och gabioner som möjliga anpassningar mot ökad erosionshastighet och användning av förankringsstänger, betongskjuvstoppar och mer kontinuerliga brobanor som anpassningar mot bortflyttade brobanor under stormar. Tabell 2 presenterar en omfattande lista över åtgärder som presenteras i litteraturen som möjliga anpassningar mot risker från klimatförändringar. Dessutom presenteras anpassningar som inte har identifierats specifikt mot klimatförändringar men bedöms som lämpliga åtgärder för att minska klimatrelaterade konsekvenser.

Med tanke på det stora antalet möjliga anpassningar (vilket framgår i Tabell 2) måste vilken anpassning som är möjlig att välja och när den ska genomföras noga beaktas. Det har upprepade gånger föreslagits att en kostnads- och riskbaserad livscykelanalys är lämplig för att svara på sådana frågor (se t.ex. ATSE 2008; CEN 2016; Gibbs 2012; Stewart et al. 2014). För detta ändamål identifierar Stewart et al. (2014) tre kriterier som kan användas för en sådan analys, nämligen nettonuvärdet (NPV); sannolikheten för

kostnadseffektivitet och kostnads-nytt-förhållande (BCR), och visar förfarandet för ett antal fallstudier.

Tabell 2 . Potentiella klimatrisker och deras eventuella anpassningar.

Potentiell inverkan	Anpassning
Accelererad nedbrytning av material	Katodiskt skydd (Stewart et al. 2012; Vicroads 2015); Ökning av betonghöljets tjocklek, förbättring av betongens kvalitet (hållfasthet), skyddande ytbeläggningar, användning av rostfritt stål, galvaniserad armering, korrosionshämmare, elektrokemisk kloridutvinning (Stewart et al. 2012); Skydd genom design, konserveringsbehandling och användning av modifierat trä för träbroar (Mahnert & Hundhausen 2017); Mer frekvent inspektion och underhåll
Värmeinducerad skada på vägbeläggning och järnvägsräls	Användning av polymermodifierade bindemedel (Vicroads 2015); Utveckling av nya värmebeständiga beläggningsmaterial (FHWA 2009; TRB 2008); Mer frekvent underhåll (ATSE 2008; FHWA 2009; FHWA 2013; Lindgren et al. 2009); Användning av betongsliprar i stället för träsliprar (Delgado & Aktas 2016); Fler rörelsefogar i vägar och räls (Meyer & Weigel 2011); Introduktion av hastighetsbegränsningar (Mehrotra et al. 2011)
Ökad långtidsdeformation	Förbättrad övervakning och inspektion av broar (Mahnert & Hundhausen 2017)
Ökad erosionshastighet	Användning av släntbeklädnad av sten (riprap) (FHWA 2009; Mondoro et al. 2018; Nemry & Demirel 2012; TRB 2008); Partiellt gjuten rипrap, betongblockssystem, gabioner. Uppströms väggar och hinder, krage etc. (Mondoro et al. 2018; TRB 2008); Användning av offerbanor (Brand, Dewoolkar, & Rizzo 2017); Ökad användning av sonar för att övervaka flöden och broerosion (FHWA 2009; TRB 2008); För ytterligare skyddsåtgärder, se t.ex. Arneson et al. (2012); och Chen och Duan (2014)
Släntkollaps och jordskred	Tillfredsställande stabiliseringsåtgärder för slänter, flodbäddsskydd (FHWA 2009; TRB 2008; Regmi & Hanaoka 2011); Flyttning, modifiering av lutningsgeometri, dränering, kvarhållande konstruktioner, inre lutningsförstärkning (se t.ex. Chen & Duan 2014, s. 337)

Grundsättningar	Flytta anläggningar till stabilare mark (Meyer & Weigel 2011); Inkorporera ökad markutgrävning vid konstruktion av infrastruktur (Meyer & Weigel 2011); Avlägsna permafrost före konstruktion, krossade bergkylsystem, isolerings-/jordkylsystem (CCSP 2008; Mehrotra et al. 2011; Meyer & Weigel 2011); Användning av olika typer av passiva kylsystem, t ex termosifoner, stenrasskydd och "kalkkulvertar" för att förhindra sättningar på grund av permafrostsmältning (TRB 2008); Byte av isrika jordar till grus (Bastedo 2007)
Stenras	Energidämpande skyddskonstruktioner för bropelare (Han et al. 2018); Dämpningsstaket och kombinerade trådnäts och kabelnätsdraperi, jordvallar för att skydda bropelare (Graham, Turner & Axtell 2016); Vägbankar och diken, Stenrasskydd, flexibla skyddssystem (Volkwein et al. 2011)
Snöskred	Flyttning, tidiga varningssystem, flödesavböjning (t.ex. jordfyllningsvallar) och hastighetsminskande metoder, skyddskonstruktioner (t.ex. lavinskydd), konstgjord igångsättning med sprängämnen, beskogning (Decaulne 2007; Ganju & Dimiri 2004; Höller 2007; Rheinberger, Bründl & Rhyner 2009)
Skräpflöde	Terrängförändring, jordförändring, skräpflödesbrytare, skräpflödesavvisare, etc. (se t.ex. Huebl & Fiebiger 2005)
Förvätskning	Stenpelare (Adalier et al. 2003; Adalier & Elgamal 2004); Grus- och gummidräneringspelare (Bahadori et al. 2018); Kemisk injektering, passiva markreningstekniker (Gallagher 2000); Jordbearbetningsmetoder (fogning), Vibro-system, inneslutning och förstärkning, avlopp, grundläggning med minipålar, djup dynamisk komprimering och djupblästring (Cooke & Mitchell 1999)
Ytterligare laster på pålar	För negativ friktion: Behandling av dämpande jordar, avlägsnande av dämpande jordar, muffar för att tillåta marken att reglera utan att orsaka neddragning, bitumenbeläggning av pålar (Davisson 1993)
Lerkrympning och svullnad	Våtkomprimering och kalkstabilisering (Kasangaki & Towhata 2009); Geofiberförstärkning (Viswanadham et al. 2009)

Högre vågkrafter	Ytbeläggningar, pelarinklädnad etc. (Mondoro et al., 2018)
Ytterligare vindlaster	Användning av styrskovlar (Larsen et al. 2000; Larsen & Larose 2015); Anpassa brobanans tvärsnitt för att reducera virvelrelaterade excitationer (Larsen & Larose 2015); Användning av dämpningsanordningar (t.ex. avstämda massdämpare, avstämda vätskedämpare) (Chen et al. 2004; Dien et al. 2013; Larsen & Larose 2015; Main & Jones 2001)
Ytterligare snölaster	Se de allmänna förstärknings- och renoveringsåtgärderna i slutet av tabellen
Högre risk för termiskt inducerade spänningar	Ökat pågående underhåll (CCSP 2008); Dimensionering för högre maximala temperaturer vid renovering eller nybyggnation (TRB 2008); Större användning av rörelsefogar (Meyer & Weigel 2011; Regmi & Hanaoka 2011); Måla bron vit för att reducera uppvärmningen (Delgado & Aktas 2016)
Ytterligare krav på avloppskapacitet	Uppgradering av dräneringssystem (Karl, Melillo, & Peterson 2009; TRB 2008); Öka normkraven för avloppskapacitet för broar (FHWA 2009, TRB 2008); Ökad lutning och spårning hos beläggningen (FHWA 2009); Ökning av övervakning av dräneringssystem (Mehrotra et al. 2011; TRB 2008)
Högre hydrostatiskt tryck bakom landfästen	Användning av ankare för att stabilisera landfästen (t.ex. Truong-Hong et al. 2013; Wade & Davies,1993); Större landfästen (Truong-Hong et al. 2013)
Ökad belastning på broar med styrluckor	Se de allmänna förstärknings- och renoveringsåtgärderna i slutet av tabellen
Förlust av förspänning	Mer frekvent inspektion, underhåll och återspänning
Isinducerad belastning	Erosionsskyddsåtgärder för att förhindra erosionsskador; Pelarskydd mot påverkan från isflak; Förstärkta anslutningar, förbättrad kontinuerlighet över stöd hos brobanan och högre läge för att förhindra skador på överbyggnaden från isackumulering

Fartygskollisioner	Fendersystem, pelarstödda system, Delfinskyddssystem, öskyddssystem, flytande skyddssystem (se t.ex. Chen & Duan 2014)
Fordon-bro kollisioner	Hastighetskontroller (Mehrotra et al. 2011), Pelarskydd (t.ex. Williamson & Winget 2005), Pelarförstärkning
Trafikolyckor	Hastighetskontroll (Mehrotra et al. 2011)
Tåg-bro kollisioner	Hastighetskontroll (Mehrotra et al. 2011); Pelarskydd (t.ex. Williamson & Winget 2005); Mer frekvent underhåll av hjul och skenor (Delgado & Aktas 2016)
Översvämningar	Förflyttning av bebyggelse eller översvämningsskydd (Mehrotra et al. 2011; Meyer & Weigel 2011); Översvämningsskydd genom sjöar, diken och öar (Stewart & Deng 2015); Förhöjning av broar, förstärkning och höjning av befintliga öar, ökning av realtidsövervakning av översvämningssnivåer, begränsning av bebyggelse i de mest utsatta kustområdena, öka försäkringsräntorna för att bidra till att begränsa utvecklingen av bebyggelse (TRB 2008). Kanaländring och stabilisering, avledning och lagring av översvämningssvatten (t.ex. Dunne 1988); Reglera flödet av vatten genom dammar (Batchabani, Sormain, & Fuamba 2016)
Stormar	Höj kritisk infrastruktur, sätt in håll, knyt ned, sätt dit hängare, förankringsstänger etc., anslut till intilliggande brospann, inklädnad (t ex orkanband etc.) (Mondoro et al. 2018); Förstärkta anslutningar, kontinuerliga brospann över fler stöd, modifierad broform, (Cleary et al. 2018); Förflyttning och begränsning av utveckling i utsatta regioner (Meyer & Weigel 2011; TRB 2008); Stärka och höja de befintliga stormbarriärerna och bygga nya (TRB 2008)
Löpeldar	Sårbarhetsbedömningar införlivade i beslut om infrastrukturplacering, användning av brandbeständiga material och landskapsdesign (Meyer & Weigel 2011); Installation av övervakningssystem, installation av brandbekämpningsutrustning på plats, genomförande av branddimensionering för broar och brandskyddssystemets huvudsakliga konstruktionselement (Naser & Kodur 2015); Vegetationshanteringsstrategier (dvs. kontrollera situationen runt

konstruktionen genom att regelbundet avlägsna vegetation i närheten av broar) (TRB 2008; Wright et al. 2013); Större brandgator, passivt brandskydd, aktivt brandskydd (t.ex. våtrörsvattensystem, torkrörsvattensystem, totala översvämningsmedel) (Wright et al. 2013)

Allmänna förstärknings- och renoveringsåtgärder

Tillägg av stålplåtar, skjuvförstärkning (extern, epoxiinsprutning och insättning av armering), jackning av trä- eller betongpålar och bropelare, efterspanning av olika brokomponenter, göra brobanan kontinuerlig över fler stöd, användning av CFRP-remsor (kolfiberförstärkta polymerer) (se t.ex. Chen & Duan 2003)

6. Diskussion, slutsatser och fortsatt arbete

I det arbete som sammanfattas i denna rapport gjordes en översyn av potentiella risker från klimatförändringar för broar samt möjliga anpassningsstrategier. Totalt identifieras och presenteras 31 potentiella klimatrisker för broar, med en kortfattad diskussion om hur de presenterade riskerna kan samverka för att ge en förhöjd total riskbild. Dessutom redovisas en omfattande lista över möjliga anpassningar för att motverka de identifierade riskerna. Även om denna översikt är omfattande kan listan över identifierade risker, deras möjliga interaktioner och/eller deras eventuella anpassningar komma att uppdateras, allt eftersom mer information blir tillgänglig i framtiden.

Figur 4 och Tabell 3 sammanfattar de risker som identifieras. Den inre cirkeln i Figur 4 visar de olika riskgrupperna i enlighet med kapitel 4. Genom förflyttning utåt presenteras riskerna inom var och en av dessa grupper följt av klimatparametrarna som driver dem på den yttersta delen av figuren. Dessutom representeras de samverkande riskerna av pilar som går mellan riskerna. Som kan ses i Tabell 3, verkar den beräknade ökningen av nederbörd i vissa regioner och den förväntade framtida temperaturhöjningen vara de två klimatparametrar som kan påverka flest risker. Även om var och en av de två klimatparametrarna endast bidrar till 18 av de potentiella riskerna, kan de två parametrarna kombinerade påverka 25 av de 31 undersökta riskerna. Om även ökad vindhastighet läggs till dessa två klimatparametrar är påverkas nästan samtliga av de potentiella riskerna, 28 av 31 risker. Figur 4 och Tabell 3 kan i framtiden kompletteras för att inkludera andra risker och/eller samverkan mellan risker.

Som framgår av denna studie är det möjligt att förutspå ett stort antal risker och effekterna av dessa risker, men beroende på förutsättningarna för en specifik bro (dvs. geografiskt läge, platsegenskaper, konstruktivt system, etc.) kommer de potentiella klimateffekterna och deras möjliga konsekvenser variera. Till exempel kan erosion endast påverka broar som korsar vattendrag; översvämning på grund av havsnivåhöjning är endast relevant för kustnära broar; och vindrelaterad instabilitet är särskilt relevant för slanka broar (dvs. häng- och snedkabelbroar). Ytterligare forskning behövs innan några avgörande slutsatser angående sannolikheter (eller till och med troligheten) och konsekvenser av de identifierade riskerna kan dras. Därmed dras inga slutsatser här kring vilken klimatförändringsrisk eller klimatparameter som är mer kritisk. Forskning med syfte att utveckla ett ramverk för riskprioritering för broar på grund av klimatförändringar pågår av författarna till denna rapport.

För att utföra en sådan prioritering måste egenskaper som är signifikant för varje risk beaktas. Exempelvis kan vissa av de undersökta riskerna, t.ex. Accelererad nedbrytning,

ökad erosion, ökad risk för skred eller översvämningar, påverkas av ett stort antal klimatparametrar, medan andra påverkas endast av en parameter, t.ex. ökad vindlast eller ändrade snöröjningskostnader. Dessutom bör det faktum att klimatmodellerna projicerar olika klimatparametrar med varierande träffsäkerhet beaktas i prioriteringen, tillsammans med hur stark bevisning det finns för att en viss risk förekommer som ett resultat av klimatförändringar. Noteras bör också att klimatets förändringar ser olika ut på olika platser, vilket betyder att specifika slutsatser för enskilda broar eller områden inte kan dras från generella sammanställningar som den i Tabell 1. Istället krävs det att detaljerad information om lokala eller regionala förändringar tas med i prioriteringsarbetet. Andra faktorer som en broars sårbarhet och omfattningen för de potentiella konsekvenserna är också av betydelse.

I samband med anpassning av broar och annan infrastruktur till ett föränderligt klimat måste ett antal frågor beaktas. För det första bör de olika sätten som de potentiella effekterna är sammanlänkade och kan påverka varandra beaktas. För att begränsa risken för feladaptation, dvs. genomförande av anpassningar som är olämpliga, rekommenderas val av anpassningsalternativ som innehåller tillräckliga säkerhetsmarginaler och är robusta, reversibla och flexibla (se t.ex. IPCC 2014). Med tanke på det stora antalet potentiella effekter från klimatförändringar bör inverkan av att anpassa sig till en risk och dess påverkan på sårbarheten mot andra risker noga beaktas. Till exempel, även om kanaländringsåtgärder, t.ex. ökande släntlutningar, kan minska risken för översvämning, kan sådana åtgärder samtidigt öka risken för erosion. Sådana exempel på motstridiga anpassningar måste identifieras och nogsamt granskas före eventuellt genomförande. Slutligen kan nämnas att det även är avgörande att identifiera när policys för minskning av utsläpp och anpassningsalternativ kan vara i konflikt (t.ex. Füssel 2007). Trots att fokus i denna rapport är på broar är många av de potentiella risker som diskuteras och deras möjliga anpassningar av betydelse även för annan byggd infrastruktur.

Tabell 3. Relevanta klimatparametrar och relaterade risker, för teckenförklaring se sid. 40.

Klimatförändringsparametrar																					
	P ↑	T ↑	W ↑	SLR	P ↓	RH ↓ & RH ↑	PF ↓	P↔	F ↑	CC ↑	SR ↑	OT ↑	PH ↓	SF ↑	S ↑	HW ↑	T↔	RO ↑	W ↓	WL↔	SS ↑
Påverkade risker	D1	D1	G2	D2	D2	D1	G1	S2	A1	D1	D1	D2	D2	I3	E1	S1	I4	G1	O3	I9	D2
	D2	D2	G3	G1	G4	D2	G4	G4	A2	D2	I4	E1	E1	O1	E2	I4	I9				
	S1	S1	I1	I7	G7	S2	G5	G7	A3												
	G1	S2	I2	E1	E3	I8	G7	G8													
	G2	G1	A1	E2	O3																
	G3	G2	E3																		
	G4	G3	O2																		
	G5	G4																			
	G6	G5																			
	G7	G8																			
	I2	I4																			
	I5	I8																			
	I6	I9																			
	I7	A2																			
	I9	A3																			
	A2	A4																			
	A3	E3																			
E1	O3																				
Σ	18	18	7	5	5	4	4	4	3	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1

D1: Accelererad nedbrytning av överbyggnad, D2: Accelererad nedbrytning av underbyggnad, S1: Värmeinducerad skada på vägbeläggningar och järnvägsräls, S2: Förhöjda långtidsdeformationer, G1: Högre erosionshastigheter, G2: Släntkollaps, G3: Jordskred, G4: Sättningar, G5: Bergskred, skräpflöden och snöskred, G6: Jordförvätskning, G7: Extrabelastning på pålar, G8: Lerkrympning och svällning, I1: Högre vågpåverkan, I2: Högre vindlast, I3: Ytterligare snölast på täckta broar, I4: Termiskt inducerad spänning, I5: Dräneringskapacitet, I6: Ökat hydrostatiskt tryck bakom landfästen, I7: Belastning på broar med styrluckor, I8: Förlust av förspänningskraft, I9: Isinducerad last, A1: Fartygskollisioner, A2: Fordon-bro kollisioner, A3: Fordonsolyckor, A4: Tåg-bro kollisioner, E1: Översvämningar, E2: Stormar, E3: Bränder, O1: Snöröjningskostnader, O2: Tidsbegränsade brobegränsningar, O3: Elbrist; P ↑, P ↓: Högre och lägre nederbörd i vissa regioner, T ↑: Högre temperaturer, W ↑: Mer frekventa/intensiva extrema vindar, SLR: Havsnivåhöjning, RH ↑, RH ↓: Ökning och minskning i relativ fuktighet, PF ↓: Permafrostsmältning, P↔: Ökning i nederbördsvariationer, F ↑: Högre vattenhalt i havsnära dimma, CC ↑: Högre koldioxidkoncentrationer, SR ↑: Mer solinstrålning, OT ↑: Högre havstemperatur, PH ↓: Minskning i global havs-pH, SF ↑: Mer snöfall, S ↑: Ökning i stormintensitet/frekvens, HW ↑: Ökning i intensitet/frekvens av värmeböljor, T↔: Högre årstidsvariationer i temperatur, RO ↑: Högre avrinningshastigheter, W ↓: Minskning av vindhastigheter, WL↔: Ökad vattennivåvariation i floder, SS ↑: Högre jordsalthalt.

7. Referenser

- Aalami, B. O. (1998). Time-dependent analysis of concrete structures. *Prog. Struct. Mater. Eng.*, 1(4), 384–391.
- Abdul Hakkim, V. M., Praveena, N., Rakhi, J. F., & Ajay Gokul, A. J. (2013). Impact study of Koottayi regulator cum bridge. *International Journal of Engineering Research and Development*, 9(3), 1–4.
- Adalier, K., Elgamal, A., Meneses, J., & Baez, J. I. (2003). Stone columns as liquefaction countermeasure in non-plastic silty soils. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23, 571–584.
- Adalier, K., & Elgamal, A. (2004). Mitigation of liquefaction and associated ground deformations by stone columns. *Engineering Geology*, 72, 275–291.
- Ajith, M. P., & James, M. K. (2016). Impact of Chamravattam regulator cum bridge on Bharathapuzha river and adjacent areas. *Indian Journal of Economics and Development*, 4(1), 2320-9828.
- Andrady, A. L., Hamid, H. S., & Torikai, A. (2003). Effects of climate change and UV-B on materials. *Photochemical and Photobiological Sciences*, 2, 68–72.
- Ankum, P. (2002). Design of open-channels and hydraulic structures. Delft, the Netherlands: Section Water Management, Delft University of Technology.
- Anyala, M., Odoki, J. B., & Baker, C. (2011, January–February). Assessment of the impact of climate change on road maintenance. In Mwakali, J. A., & Alinaitwe, H. M. (Eds.). *Proceedings of the 2nd International Conference on Advances in Engineering and Technology (AET2011)* (pp. 457–463), Entebbe, Uganda: MacMillan.
- Arnell, N. W., & Gosling, S. N. (2013). The impacts of climate change on river flow regimes at the global scale. *Journal of Hydrology*, 486, 351–364.
- Arneson, L., Zevenbergen, L., Lagasse, P., & Clopper, P. (2012). Evaluating scour at bridges Fifth edition (Report No. FHWA-HIF-12-003) (HEC-18). Washington, DC: FHWA
- ATSE. (2008). Assessment of impacts of climate change on Australia’s physical infrastructure. Parkville, Victoria: Australian Academy of Technological Sciences and Engineering (ATSE).
- Auld, H., MacIver, D., & Klaassen, J. (2006, May). Adaptation options for infrastructure under changing climate conditions. Paper presented at the Engineering Institute of Canada Climate Change Technology Conference, Environment Canada, Adaptation and Impacts Research Division, Ottawa.
- Auld, H., Waller, J., Eng, S., Klaassen, S., Morris, R., Fernandez, S., Cheng, V., & MacIver, D. (2010, August). The Changing Climate and National Building Codes and Standards. Paper presented at the Ninth Symposium on the Urban Environment (Session 5.6), American Meteorological Society, Keystone, CO.
- Bahadori, H., Farzalizadeh, R., Barghi, A., & Hasheminezhad, A. (2018). A comparative study between gravel and rubber drainage columns for mitigation of liquefaction hazards. *J. of Rock Mechanics and Geo. Eng.*, 10, 924–934.
- Balaguru, P. N., & Gopu, V. J. (2016). Repair of Morganza Spillway Bridge bent pile cap using Carbon Fiber Reinforcement (CFR) (Report No. FHWA/LA.15/552). Baton Rouge, LA: Department of Civil and Environmental Engineering, Louisiana State University.
- Bastedo, J. (2007). On the Frontlines of Climate Change: What’s Really Happening in the Northwest Territories. Yellowknife, Canada: Government of the Northwest Territories.
- Bastidas-Arteaga, E., Schoefs, F., Stewart, M. G., & Wang, X. (2013). Influence of global warming on durability of corroding RC structures: A probabilistic approach. *Eng. Struct.*, 51(Part A), 259–266.

- Bastidas-Arteaga, E., & Stewart, M. G. (2015). Damage risks and economic assessment of climate adaptation strategies for design of new concrete structures subject to chloride-induced corrosion. *Struct. Saf.*, 52, 40–53.
- Batchabani, E., Sormain, E., & Fuamba, M. (2016). Potential Impacts of Projected Climate Change on Flooding in the Riviere Des Prairies Basin, Quebec, Canada: One-Dimensional and Two-Dimensional Simulation-Based Approach. *Journal of Hydraulic Engineering*, 21(12), 05016032.
- Bažant, Z. P., & Baweja, S. (1995). Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures-model B3. *Mat. and Struct.*, 28, 357–365, 415–430.
- Bažant, Z. P., Hubler, M. H., & Yu, Q. (2011). Pervasiveness of excessive segmental bridge deflections: wake-up call for creep. *ACI Structural Journal*, 108(6), 766–774.
- Bažant, Z. P., & Panula, L. (1978). Practical prediction of time-dependent deformations of concrete. *Materials and Structures (RILEM, Paris)*, Part IV, 11, 425–434.
- Beck, M. W., Losada, I. J., Menéndez, P., Reguero, B. G., Díaz-Simal, P., & Fernández, F. (2018). The global flood protection savings provided by coral reefs. *Nature Communications*, 9, 2186.
- Bell, K. (2008). Timber bridges. In Leonardo da Vinci Pilot Project TEMTIS. Handbook 1-Timber structures (pp. 209–226). <http://fast10.vsb.cz/temtis/en/>
- Beltaos, S. (2004). Climate impacts on the ice regimes of an Atlantic river. *Nordic Hydrology*, 35(2), 81–99.
- Beltaos, S., & Burrell, B. C. (2003). Climatic change and river ice breakup. *Can. J. Civ. Eng.*, 30(1), 145–155.
- Beltaos, S., Burrell, B. C., Miller, L., & Sullivan, D. (2003, June). Hydraulic interaction between ice and bridges. Paper presented at the 12th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers. CGU HS Committee on River Ice Processes and the Environment. Edmonton, AB, Canada.
- Berggren, K. (2007). Urban drainage and climate change - Impact Assessment (Licentiate thesis). Retrieved from www.diva-portal.org/smash/get/diva2:998949/FULLTEXT01.pdf
- Björnsson, I. (2015). Holistic approach in engineering design: Controlling risks from accidental hazards in bridge design (Doctoral dissertation). Retrieved from <http://lup.lub.lu.se/record/8052270>
- Bloom, A., Kotroni, V., & Lagouvardos, K. (2008). Climate change impact of wind energy availability in the Eastern Mediterranean using the regional climate model PRECIS. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8, 1249–1257.
- Brand, M. W., Dewoolkar, M. M., & Rizzo, D. M. (2017). Use of sacrificial embankments to minimize bridge damage from scour during extreme flow events. *Nat. Hazards*, 87, 1469–1487.
- Briaud, J. L., Brandimarte, L., Wang, J., & D’Odorico, P. (2007). Probability of scour depth exceedance owing to hydrologic uncertainty. *Georisk*, 1(2), 77–88.
- Briaud, J. L., Gardoni, P., & Yao, C. (2014). Statistical, risk, and reliability analyses of bridge scour. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 140(2), 04013011.
- Brun, M., Giaccu, G. F., Movchan, A. B. & Slepyan, L. I. (2014). Transition wave in the collapse of the San Saba Bridge. *Frontiers in Materials*, 1, 1–12.
- Cady, P. D., & Weyers, R. E. (1984). Deterioration rates of concrete bridge decks. *J. Transp. Eng.*, 110(1), 34–44.
- Cannon, S. H., & DeGraff, J. (2009). The increasing wildfire and post-fire debris-flow threat in western USA, and implications for consequences of climate change. In K. Sassa, & P. Canuti (Eds.). *Landslides – Disaster Risk Reduction* (pp. 177–190). Berlin & Heidelberg, Germany: Springer-Verlag.
- Capon, R., & Oakley, G., (2012). Climate Change Risk Assessment for the Built Environment Sector (Defra Project Code GA0204). London: Department for Environment, Food and Rural Affairs.
- Carll, C. & Wiedenhoef, A. C. (2009). Moisture-related properties of wood and the effects of moisture on wood and wood products. In H.R. Trechsel & M.T. Bomberg (Eds.). *Moisture control in buildings: The key factor in mold prevention* (pp. 54–79). West Conshohocken, PA, USA: ASTM International.
- Carvalho, D., Rocha, A., Gómez-Gesteira, M., & Silva Santos, C. (2017). Potential

- impacts of climate change on European wind energy resource under the CMIP5 future climate projections. *Renewable Energy*, 101, 29–40.
- CCSP (Climate Change Science Program). (2008). *Impacts of Climate Change and Variability on Transportation Systems and Infrastructure: Gulf Coast Study, Phase I. A Report by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research*. Savonis, M. J., V.R. Burkett, and J.R. Potter (Eds.). Washington, DC: Department of Transportation.
- CEN. (2016). *Guide for addressing climate change adaptation in standards (Report No. CEN-CLC Guide 32:2016)*. Brussels: European Committee for Standardization.
- Changnon, S. A., Kunkel, K. E. & Reinke, B. C. (1996). *Impacts and Responses to the 1995 Heat Wave: A Call to Action*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, 1497–1506.
- Chanson, H. (2004). *The hydraulics of open channel flow: An introduction: Basic principles, sediment motion, hydraulic modelling, design of hydraulic structures*. Oxford: Elsevier Butterworth- Heinemann.
- Chapman, R. J. (2001). The controlling influences on effective risk identification and assessment for construction design management. *Int. J. Project Manage.*, 19, 147–160.
- Charles, J. A., & Watts, K. S. (1996). The assessment of the collapse potential of fills and its significance for building on fill. *Proc. Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 119(1), 15–28.
- Chaves, I. A., Melchers, R. E., Peng, L., & Stewart, M. G. (2016). Probabilistic remaining life estimation for deteriorating steel marine infrastructure under global warming and nutrient pollution. *Ocean Eng.*, 126, 129–137.
- Chen, H., Lee, C. F., & Law, K. T. (2004). Causative mechanisms of rainfall-induced fill slope failures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(6), 593–602.
- Chen, W-F., & Duan, L. (2003). *Bridge Engineering: Construction and maintenance*. NY: CRC Press.
- Chen, W-F., & Duan, L. (2014). *Bridge Engineering Handbook: Substructure design*. NY: CRC Press.
- Chen, Z. Q., Wang, X. Y., Ko, J. M., Ni, Y. Q., Spencer, B. F., & Yang, G. (2004). MR damping system for mitigating wind-rain induced vibration on Dongting Lake Cable-Stayed Bridge. *Wind and Structures*, 7(5), 293–304.
- Cheung, C. W. S., Walsh, F. C., Campbell, S. A., Chao, W. T., & Beech, I. B. (1994). Microbial contributions to the marine corrosion of steel piling. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 1994, 259–274.
- Chin, J. W., Nguyen, T., & Aouadi, K. (1997). Effects of environmental exposure on fiber-reinforced plastic (FRP) materials used in construction. *J Compos. Tech. Res.*, 19(4), 205–213.
- Chok, Y. H., Kaggwa, W. S., Jaksa, M. B., & Griffiths, D. V. (2004, February). *Modelling the Effects of Vegetation on Stability of Slopes*. In G. Farquhar, P. Kelsey, J. Marsh, & D. Fellows (Eds.). *Proceedings of the 9th Australia New Zealand Conference on Geomechanics* (pp. 391–397). Auckland, New Zealand: Centre for Continuing Education, The University of Auckland.
- Ciabatta, L., Camici, S., Brocca, L., Ponziani, F., Stelluti, M., Berni, N., & Moramarco, T. (2016). Assessing the impact of climate-change scenarios on landslide occurrence in Umbria Region, Italy. *Journal of Hydrology*, 541, 285–295.
- Cleary, J. C., Webb, B. M., Douglass, S. L., Buhring, T., & Steward, E. J. (2018). Assessment of engineering adaptations to extreme events and climate change for a simply supported interstate bridge over a shallow estuary: case study. *J. Bridge Eng.*, 23(12), 05018011.
- Collins, B. D., & Stock, G. M. (2016). Rockfall triggering by cyclic thermal stressing of exfoliation fractures. *Nature Geoscience*, 9, 395–401.
- Comité Européen du Béton. (1963). *Pratiques a l'Usage des Constructeurs*. *Bulletin d'Information nQ 39*. Paris.
- Connor, T., Niall, R., Cummings, P., & Papillo, M. (2013). Incorporating climate change adaptation into engineering design concepts and solutions. *Australian Journal of Structural Engineering*, 14(2), 125–134.
- Cook, W., Barr, P. J., & Halling, M. W. (2015). Bridge Failure Rate. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 29(3), 04014080.

- Cooke, H. G., & Mitchell, J. K. (1999). Guide to remedial measures for liquefaction mitigation at existing highway bridge sites (Report No. MCEER-99-0015). NY: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research.
- Corti, T., Muccione, V., Kollner-Heck, P., Bresch, D., & Seneviratne, S. I. (2009). Simulating past droughts and associated building damages in France. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(9), 1739–1747.
- Corus Construction and Industrial. (2005). A corrosion protection guide: For steel bearing piles in a temperate climate. North Lincolnshire: Corus Construction and Industrial.
- Cradden, L. C., Harrison, G. P., & Chick, J. P. (2006, June). Climate change and the UK wind resource. Paper presented at European Conference on Impacts of Climate Change on Renewable Energy Sources (EURENEW), Iceland.
- Crilly, M. (2001). Analysis of a database of subsidence damage. *Structural Survey*, 19(1), 7–15.
- Darwin, D., Browning, J.A., Gong, L., & Hughes, S. R. (2008). Effects of deicers on concrete deterioration. *ACI Materials Journal*, (Dec. –Nov. 2008), 622–627.
- Dasgupta, S., Hossain, M. M., Huq, M., & Wheeler, D. (2015). Climate change and soil salinity: The case of coastal Bangladesh. *Ambio*, 44, 815–826.
- Davisson, M. T. (1993, June). Negative skin friction in piles and design decisions. Paper presented at the third international conference on case histories in geotechnical engineering, St. Louis: MO.
- Davy, R., Gnatiuk, N., Pettersson, L., & Bobylev, L. (2018). Climate change impacts on wind energy potential in the European domain with a focus on the Black Sea. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1652–1659.
- Decaulne, A. (2007). Snow-avalanche and debris-flow hazards in the fjords of north-western Iceland, mitigation and prevention. *Natural Hazards*, 41, 81–98.
- Delgado, D., & Aktas, C. B. (2016). Resilience of rail infrastructure in the U.S. Northeast corridor. *Procedia Engineering*, 145, 356–363.
- Deng, L., & Cai, C. S. (2010). Bridge scour: Prediction, modeling, monitoring, and countermeasures-review. *Pract. Period. Struct. Des. Constr.*, 15(2), 125–134.
- Dikanski, H., Hagen-Zanker, A., Imam, B., & Avery, K. (2016). Climate change impacts on railway structures: bridge scour. *Engineering Sustainability*, 170(ES5), 237–248.
- Dikanski, H., Imam, B., & Hagen-Zanker, A. (2018). Effects of uncertain asset stock data on the assessment of climate change risks: A case study of bridge scour in the UK. *Structural Safety*, 71, 1–12.
- DoT (Department of Transport). (2005). The changing climate: its impact on the department of transport. UK: Department of Transport. <http://www.dft.gov.uk/pgr/scienceresearch/key/thechangingclimateitsim2005>.
- Dunne, T. (1988). Geomorphologic contributions to flood control planning. In V. R. Baker, R. C. Kochel, & P. C. Patton (Eds.), *Flood geomorphology* (pp. 421–438). Chichester, UK: Wiley and Sons.
- Ekström, G., Nettles, M., & Tsai, V. C. (2006). Seasonality and Increasing Frequency of Greenland Glacial Earthquakes. *Science*, 311, 1756–1758.
- Elliott, J. G., & Parker, R. S. (2001). Developing a post-fire flood chronology and recurrence probability from alluvial stratigraphy in the Buffalo Creek watershed, Colorado, USA. *Hydrological Processes*, 15(2001), 3039–3051.
- England, G. L., & Ross, A. D. (1962). Reinforced concrete under thermal gradients. *Magazine of Concrete Research*, 14(40), 5–12.
- FHWA. (2009). Literature review: Climate change vulnerability assessment, risk assessment, and adaptation approaches. Retrieved from: https://www.fhwa.dot.gov/environment/sustainability/resilience/publications/vulnerability_assessment/index.cfm
- FHWA. (2013). Planning for systems management & operations as part of climate change adaptation (Report No. FHWA-HOP-13-030). Washington, DC: Federal Highway Administration Office of Operations.
- Flint, M. M., Fringer, O., Billington, S. L., Freyberg, D., & Diffenbaugh, N. S. (2017). Historical analysis of hydraulic bridge collapses in the continental United

- States. *J. Infrastruct. Syst.*, 23(3), 04017005.
- Fransson, L. (1988). Thermal ice pressure on structures in ice covers (Doctoral dissertation). Retrieved from <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:990630/FULLTEXT01.pdf>
- Freudenthal, A.M. (1945). The safety of structures. *Trans. American Society of Civil Engineers*, 112, 125–180.
- Froehlich, D. C. (1989, August). Local scour at bridge abutments. In M. A. Ports (Ed.). *Proc. of the 1989 National Conf. on Hydraulic Engineering* (pp. 13–18). New York, USA: ASCE.
- Füssel, H. -M. (2007). Adaptation planning for climate change: concepts, assessment approaches, and key lessons. *Sustain. Sci.*, 2, 265–275.
- Gallagher, P. M. (2000). Passive site remediation for mitigation of liquefaction risk (Doctoral dissertation). Retrieved from <https://vtechworks.lib.vt.edu/handle/10919/29610>
- Ganju, A., & Dimiri, A. P. (2004). Prevention and mitigation of avalanche disasters in Western Himalayan Region. *Nat. Hazards*, 31, 357–371.
- GDV (German Association of Insurers). (2011). *The climate change challenge, Answers and demands of German insurers*. Berlin: GDV.
- Geymayer, H. G. (1972). Effect of temperature on creep of concrete: A literature review. *Concrete for Nuclear Reactors, Vol. I, ACI Special Publication SP-34* (pp. 565–589). Detroit: American Concrete Institute.
- Gibbs, M. T. (2012). Time to re-think engineering design standards in a changing climate: the role of risk-based approaches. *J. of Risk Research*, 15(7), 711–716.
- Gonçalves-Ageitos, M., Barrera-Escoda, A., & Baldasano, J. M. (2015). Modelling wind resources in climate change scenarios in complex terrains. *Renewable Energy*, 76, 670–678.
- Gornitz, V., Couch, S., & Hartig, E. K. (2002). Impacts of sea-level rise in the New York City metropolitan area. *Glob. Planet. Change*, 32, 61–88.
- Graham, D. S., Turner, J. P., & Axtell, P. J. (2016, July). Rockfall hazard mitigation at the TH-53 Bridge, Virginia, Minnesota. Paper presented at the 67th Highway Geology Symposium, Colorado Springs: CO.
- Gruber, S., Hoelzle, M., & Haeberli, W. (2004). Permafrost thaw and destabilization of Alpine rock walls in the hot summer of 2003. *Geophysical Research Letters*, 31, L13504.
- Gudipudi, P. P., Underwood, B. S., & Zalghout, A. (2017). Impact of climate change on pavement structural performance in the United States. *Transportation Research*, 57(Part D), 172–184.
- Hallegatte, S. (2009). Strategies to adapt to an uncertain climate change. *Global Environmental Change*, 19, 240–247.
- Hamin, E. M., & Gurran, N. (2009). Urban form and climate change: Balancing adaptation and mitigation in the U.S. and Australia. *Habitat International*, 33, 238–245.
- Hampel, A., Hetzel, R., & Maniatis, G. (2010). Response of faults to climate-driven changes in ice and water volumes on Earth's surface. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 368(2010), 2501–2517.
- Harris, C., Arenson, L. U., Christiansen, H. H., Etzelmüller, B., Frauenfelder, R., Gruber, S., ... Mühl, D. V. (2009). Permafrost and climate in Europe: monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses. *Earth-Science Reviews*, 92(2009), 117–171.
- He, S., Yan, S., Deng, Y., & Liu, W. (2018). Impact protection of bridge piers against rockfall. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1250-5>
- Hejnic, J. (1988). Thermal stresses in concrete bridges. *IABSE congress report*, 13, 425–430.
- Hernandez, H. D., & Gamble, W. L. (1975). Time-dependent prestress losses in pre-tensioned concrete construction (Structural Research Series No. 417). Urbana, Illinois: Civil Engineering Studies, University of Illinois.
- Hill, D. (2012). The lessons of Katrina, learned and unlearned. *Journal of Coastal Research*, 28(2), 324–331.
- Hoeppe, P. (2016). Trends in weather related disasters –Consequences for insurers and

- society. *Journal of Weather and Climate Extremes*, 11, 70–79.
- Holper, P., Lucy, S., Nolan, M., Senese, C., & Hennessy, K. (2007). Infrastructure and climate change risk assessment for Victoria. Report to the Victorian government. Australia: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation.
- Holzer, S. M., Loferski, J. R., & Dillard, D. A. (1989). A review of creep in wood: Concepts relevant to develop long-term behavior predictions for wood structures. *Wood and Fiber Science*, 21(4), 376–392.
- Honfi, D. (2013). Design for serviceability – A probabilistic approach (Doctoral dissertation). Retrieved from <http://lup.lub.lu.se/record/4216141>
- Hong, J. H., Chiew, Y. M., Lu, J. Y., Lai, J. S., & Lin, Y. B. (2012). Houfeng Bridge Failure in Taiwan. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(2), 186–198.
- Houghton, H. G., & Radford, W. H. (1938). On the measurement of drop size and liquid water content in fogs and clouds. *Pap. Phys. Oceanogr. Meteor.*, 6(4), 31pp.
- Hudson, L. (2004). Highways asset management case study, UKCIP costing method case study. UK Climate Impacts Programme.
- Huebl, J., & Fiebiger, G. (2005). Debris-flow mitigation measures. In M. Jakob & O. Hungr, (Eds.), *Debris-flow Hazards and Related Phenomena* (pp. 445–487). Berlin: Springer.
- Hultén, C., Andersson-Sköld, Y., Ottosson, E., Edstam, T., & Johansson, Å. (2007, May). Case studies of landslide risk due to climate change in Sweden. In R. McInnes, J. Jakeways, H. Fairbank, & E. Mathie (Eds.), *Landslides and Climate Change: Challenges and Solutions, Proceedings of the International Conference on Landslides and Climate Change* (pp. 149–157). London, UK: Taylor & Francis.
- Höller, P. (2007). Avalanche hazards and mitigation in Austria: A review. *Nat Hazards*, 43, 81–101.
- Imada, Y., Maeda, S., Watanabe, M., Shiogama, H., Mizuta, R., Ishii, M., & Kimoto, M. (2017). Recent enhanced seasonal temperature contrast in Japan from large ensemble high-resolution climate simulations. *Atmosphere*, 8(57), atmos8030057.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2012). Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. A special report of working groups I and II of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge & New York: Cambridge University Press.
- IPCC (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis- Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge & New York: Cambridge University Press.
- IPCC (2014). *Climate Change 2014-Impacts, Adaptation, and Vulnerability-Part A: Global and Sectoral Aspects-Working Group II Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge & New York: Cambridge University Press.
- IPCC (2018). Summary for Policymakers. In: *Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [V. Masson-Delmotte, P. et al. (Eds)]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 32 pp.
- Jeong, H., Kim, H., Kim, K., & Kim, H. (2017). Prediction of flexible pavement deterioration in relation to climate change using fuzzy logic. *J. Infrastruct. Syst.*, 23(4), 04017008.
- Jevrejeva, S., Jackson, L. P., Grinsted, A., Lincke, D., & Marzeion, B. (2018). Flood damage costs under the sea level rise with warming of 1.5 °C and 2 °C. *Environ. Res. Lett.*, 13(2018), 074014.
- Kallias, A. N., Imam, B. (2016). Probabilistic assessment of local scour in bridge piers under changing environmental conditions. *Structure and Infrastructure Engineering*, 12(9), 1228–1241.
- Kaplan, S. (1997). The words of risk analysis. *Risk Analysis*, 17(4), 407–417.
- Kaplan, S., Haimes, Y. Y., & Garrick, B. J. (2001). Fitting hierarchical holographic modeling into the theory of scenario structuring and a resulting refinement to

- the quantitative definition of risk. *Risk Analysis*, 21(5), 807–819.
- Karl, T. R., Melillo, J. M., & Peterson, T. C. (Eds.). (2009). *Global climate change impacts in the United States*. Cambridge & New York: Cambridge University Press.
- Kasangaki, G. J., & Towhata, I. (2009). Wet compaction and lime stabilization to mitigate volume change potential of swelling clayey soils. *Soils and Foundations*, 49(5), 813–821.
- Kattel, J., & Eriksson, M. (1998). *Bridge scour evaluation: Screening, analysis, & countermeasures*. Washington, DC: Forest Service, USDA.
- Kawai, H., Koshiro, T., Endo, H., Arakawa, O., & Hagihara, Y. (2016). Changes in marine fog in a warmer climate. *Atmos. Sci. Let.*, 17, 548–555.
- Kean, J. W., Staley, D. M., & Cannon, S. H. (2011). In situ measurements of post-fire debris flows in southern California: Comparisons of the timing and magnitude of 24 debris-flow events with rainfall and soil moisture conditions. *Journal of Geophysical Research*, 116, F04019.
- Kelly, A. J., Sauer, E. K., Christiansen, E. A., Barbour, S. L., & Widger, R. A. (1995). Deformation of the Deer Creek bridge by an active landslide in clay shale. *Canadian Geotechnical Journal*, 32, 701–724.
- Kerr, G. H., DeGaetano, A. T., Stoof, C. R., & Ward, D. (2018). Climate change effects on wildland fire risk in the Northeastern and Great Lakes states predicted by a downscaled multi-model ensemble. *Theor. Appl. Climatol.*, 131, 625–639.
- Klaassen, R. K. W. M. (2015, September). Life expectation of wooden foundations - a non-destructive approach. Paper presented at the International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Berlin.
- Kleissl, K., & Georgakis, C. (2010, May). Bridge ice accretion and de- and anti-icing systems: A review. Paper presented at the 7th International Cable Supported Bridge Operators' Conference (7th ICSBOC), Zhenjiang, China.
- Komori, D., Rangsiwanichpong, P., Inoue, N., Ono, K., Watanabe, S., & Kazama, S. (2018). Distributed probability of slope failure in Thailand under climate change. *Climate Risk Management*, 20(2018), 126–137.
- Kristo, C., Rahardjo, H., & Satyanaga, A. (2017). Effect of variations in rainfall intensity on slope stability in Singapore. *International Soil and Water Conservation Research*, 5, 258–264.
- Kumar, P., Imam, B., (2013). Footprints of air pollution and changing environment on the sustainability of built infrastructure. *Sci. Total Environ.*, 444, 85–101.
- Kumlai, S., Jitsangiam, P., & Pichayapan, P. (2017). The implications of increasing temperature due to climate change for asphalt concrete performance and pavement design. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(4), 1222–1234.
- Köliö, A., Pakkala, T. A., Lahdensivu, J., & Kiviste, M. (2014). Durability demands related to carbonation induced corrosion for Finnish concrete buildings in changing climate. *Engineering Structures*, 62-63, 42–52.
- Larsen, A., & Larose, G. L. (2015). Dynamic wind effects on suspension and cable-stayed bridges. *Journal of Sound and Vibration*, 334, 2–28.
- Larsen, A., Esdahl, S., Andersen, J. E., & Vejrum, T. (2000). Storbælt suspension bridge – vortex shedding excitation and mitigation by guide vanes. *J. of Wind Engineering*, 88, 283–296.
- Larsson, O. (2015). Climate change effects on design thermal actions for concrete structures, IABSE Conference – Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges, Geneva, Switzerland
- Lichtenstein, A. G. (1993). The silver bridge collapse recounted. *J. Perform. Constr. Facil.*, 7(4), 249–261.
- Liljegren, E. (2016). Handlingsplan för Trafikverkets klimatanpassningsstrategi: Förkortad version [Action plan for the Swedish Transport Administration climate adaptation strategy: Shortened version]. Borlänge: Trafikverket.
- Lindgren, J., Jonsson, D. K., & Carlsson-Kanyama, A. (2009). Climate adaptation of railways: lessons from Sweden. *EJTIR*, 9(2), 164–181.
- Lozano, O. M., Salis, M., Ager, A. A., Arca, B., Alcasena, F. J., Monteiro, A. T., ... Spano, D. (2017). Assessing climate change impacts on wildfire exposure in Mediterranean areas. *Risk Analysis*, 37(10), 1898–1916.

- Madsen, H., Lawrence, D., Lang, M., Martinkova, M., & Kjeldsen, T. R. (2014). Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe. *J. of Hydrology*, 519, 3634–3650.
- Mahnert, K-C., & Hundhausen, U. (2017). A review on the protection of timber bridges. *Wood Material Science & Eng.*, DOI: 10.1080/17480272.2017.1403955.
- Main, J. A., & Jones, N. P. (2001). Evaluation of viscous dampers for stay-cable vibration mitigation. *J. Bridge Eng.*, 6(6), 385–397.
- Mallick, D. V., Tawil, M. M., & Shibani, A. A. (1989). Durability of foundation concrete in an aggressive environment. IABSE reports, IABSE Symposium (Lisbon): Durability of structures, 57(1), 243–248.
- Mallick, R. B., Jacobs, J. M., Miller, B. J., Daniel, J. S., & Kirshen, P. (2018). Understanding the impact of climate change on pavements with CMIP5, system dynamics and simulation. *International Journal of Pavement Engineering*, 19(8), 697–705.
- Margreth, S., & Ammann, W. J. (2004). Hazard scenarios for avalanche actions on bridges. *Annals of Glaciology*, 38, 89–96.
- Mayer, M. (1926). Die Sicherheit der Bauwerke und ihre Berechnung nach Grenzkraejten instate nach Zulassigen Spannungen [The safety of constructional works and its design according to limit states instead of permissible stresses] (Unpublished doctoral dissertation). Springer Verlag, Berlin. (English and Spanish translations published by ANATOMIC, Madrid, 1975).
- McGuire, B. (2012). Waking the Giant: How a changing climate triggers earthquakes, tsunamis, and volcanos. Oxford: Oxford University Press.
- McKenzie, R. L., Aucamp, P. J., Bais, A. F., Björn, L. O., Ilyas, M., & Madronich, S. (2011). Ozone depletion and climate change: impacts on UV radiation. *Photochemical and Photobiological Sciences*, 10, 182–198.
- McInnes, K. L., Walsh, K. J. E., Hubbert, G. D., & Beer, T. (2003). Impact of sea-level rise and storm surges on a coastal community. *Nat. Hazards*, 30(2), 187–207.
- Mehrotra, S., Lefevre, B., Zimmerman, R., Gerçek, H., Jacob, K., & Srinivasan, S. (2011). Climate change and urban transportation systems. In C. Rosenzweig, W. D. Solecki, S. A. Hammer, S. Mehrotra (Eds.). *Climate Change and Cities: First Assessment Report of the Urban Climate Change Research Network* (pp. 145–177). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Meyer, M. (2008). Design standards for U.S. transportation infrastructure: The implications of climate change (Special Rep. 290). Washington, DC: Transportation Research Board. <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/sr/sr290Meyer.pdf>
- Meyer, M., & Weigel, B. (2011). Climate change and transportation engineering: Preparing for a sustainable future. *J. Transp. Eng.*, 137(6), 393–403.
- Mideksa, T. K., & Kallbekken, S. (2010). The impact of climate change on the electricity market: A review. *Energy Policy*, 38, 3579–3585.
- Moncmanová, A. (2007). Environmental factors that influence the deterioration of materials. *WIT Transactions on State of the Art in Science and Engineering*, 28, 1–25.
- Mondoro, A., Frangopol, D. M., & Liu, L. (2018). Bridge adaptation and management under climate change uncertainties: A review. *Nat. Hazards Rev.*, 19(1), 04017023.
- Moody, J. A., & Martin, D. A. (2001). Post-fire, rainfall intensity-peak discharge relations for three mountainous watersheds in the western USA. *Hydrological Processes*, 15, 2981–2993.
- Mudd, L., Wang, Y., Letchford, C., & Rosowsky, D. (2014a). Assessing climate change impact on the U.S. East Coast Hurricane hazard: temperature, frequency, and track. *Nat. Hazards Rev.*, 15(3), 04014001.
- Mudd, L., Wang, Y., Letchford, C., & Rosowsky, D. (2014b). Hurricane wind hazard assessment for rapidly warming climate scenario. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 133, 242–249.
- Mårtensson, A. (1994). Mechano-sorptive effects in wooden material. *Wood Science and Technology*, 28, 437–449.
- Naser, M. Z., & Kodur, V. K. R. (2015). A probabilistic assessment for classification

- of bridges against fire hazard. *Fire Safety Journal*, 76, 65–73.
- Nasr, A., Björnsson, I., Honfi, D., Ivanov, O. L., Johansson, J., & Kjellström, E. (2019, May). Towards a holistic prioritization of climate-change risks for bridges. ICASP13, Seoul, South Korea.
- Nasser, K. M., & Neville, A. M. (1967). Creep of old concrete at normal and elevated temperatures. *ACI JOURNAL Proceedings*, 64(2), 97–103.
- Nath, S. K., Adhikari, M. D., Maiti, S. K., Devaraj, N., Srivastava, N., & Mohapatra, L. D. (2014). Earthquake scenario in West Bengal with emphasis on seismic hazard microzonation of the city of Kolkata, India. *Nat. Hazard Earth Sys.*, 14, 2549–2575.
- Nath, S. K., Srivastava, N., Ghatak, C., Adhikari, M. D., Ghosh, A., & Ray, S. P. S. (2018). Earthquake induced liquefaction hazard, probability and risk assessment in the city of Kolkata, India: its historical perspective and deterministic scenario. *J. Seismol.*, 22, 35–68.
- Neary, D. G., Gottfried, G. J., & Ffolliott, P. F. (2003, November). Post-wildfire watershed flood responses. In the Second International Fire Ecology and Fire Management Congress (paper 1B7). Orlando, Florida.
- Neil, C. R. (1964). River bed scour, a review for bridge engineers (Contract No. 281). Calgary, Alta., Canada: Research Council of Alberta.
- Nemry, F., & Demirel, H. (2012). Impacts of climate change on transport: A focus on road and rail transport infrastructures (Report No. JRC72217). Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Nikitas, N. (2011). Wind-induced dynamic instabilities of flexible bridges (Doctoral dissertation). Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Nikolaos_Nikitas2/publication/292976045_Wind-Induced_Dynamic_Instabilities_of_Flexible_Bridges/links/56b325c108ae56d7b06d637e.pdf
- Novak, P., Moffat, A., Nalluri, C., & Narayanan, R. (2014). *Hydraulic structures*. NY: Taylor & Francis.
- Obermeier, S. F. (1996). Use of liquefaction-induced features for paleoseismic analysis—an overview of how seismic liquefaction features can be distinguished from other features and how their regional distribution and properties of source sediment can be used to infer the location and strength of Holocene paleo-earthquakes. *Eng. Geol.*, 44(1), 1–76.
- Ohunakin, O. S., Adaramola, M. S., Oyewola, O. M., Matthew, O. J., & Fagbenle, R. O. (2015). The effect of climate change on solar radiation in Nigeria. *Solar Energy*, 116, 272–286.
- Olofsson, M. (2007). Climate change and urban drainage- Future precipitation and hydraulic impact (Licentiate thesis). Retrieved from <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:989804/FULLTEXT01.pdf>
- Padgett, J., DesRoches, R., Nielson, B., Yashinsky, M., Kwon, O., Burdette, N., & Tavera, E. (2008). Bridge damage and repair costs from Hurricane Katrina. *J. Bridge Eng.*, 13(1), 6–14.
- Pakkala, T. A., Köliö, A., Lahdensivu, J., & Pentti, M. (2015). The effect of climate change on freeze-thaw cycles in Nordic climate. In C. Andrade, J. Gulikers, R. Polder (Eds.). *Durab. Reinf. Concr. From Composition to Prot. Selected papers of the 6th International RILEM PhD Workshop* (pp. 145–154). Cham, Springer International Publishing.
- Petermann, T., Bradke, H., Lüllmann, A., Poetzsch, M., & Riehm, U. (2011). What happens during a blackout: Consequences of a prolonged and wide-ranging power outage. *Technology Assessment Studies Series – 4*. Berlin: Office of Technology Assessment at the German Bundestag.
- Pietro, C., Paolo, F., Filippo, L., Paola, M., Edoardo, B., Alessandro, D., & Silvia, D. (2016). Towards new European snow load maps (Report No. JRC103265). Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Prowse, T., Alfredsen, K., Beltaos, S., Bonsal, B., Duguay, C., Korhola, A., ... Weyhenmeyer, G. (2011). Changing lake and river ice regimes: Trends, effects and implications. In *Snow, water, ice and permafrost in the Arctic (SWIPA)* (Chapter 6), Oslo: Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP).
- Qiao, Y. (2015). Flexible pavements and climate change: impact of climate change on the performance, maintenance, and life-

- cycle costs of flexible pavements (Doctoral dissertation). Retrieved from <http://eprints.nottingham.ac.uk/29582/1/Thesis%20%28V15%29.pdf>
- Qu, W., Wang, J., Zhang, X., Yang, Z., & Gao, S. (2015). Effect of cold wave on winter visibility over eastern China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120, 2394–2406.
- Raspotnig, C., & Opdahl, A. (2013). Comparing risk identification techniques for safety and security requirements. *The Journal of Systems and Software*, 86, 1124–1151.
- Razak, H. A. (1986). Time dependent effects in reinforced concrete sections subjected to flexure (Doctoral dissertation). Retrieved from <http://epubs.surrey.ac.uk/1003/1/fulltext.pdf>
- Regmi, M. B., & Hanaoka, S. (2011). A survey on impacts of climate change on road transport infrastructure and adaptation strategies in Asia. *Environ. Econ. Policy Stud.*, 13, 21–41.
- Rheinberger, C. M., Bründl, M., & Rhyner, J. (2009). Dealing with the white death: Avalanche risk management for traffic routes. *Risk Analysis*, 29(1), 76–94.
- Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., ... Rafaj, P. (2011). RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change*, 109, 33–57.
- Robinson, J. D., Vahedifard, F., & AghaKouchak, A. (2017). Rainfall-triggered slope instabilities under a changing climate: comparative study using historical and projected precipitation extremes. *Can. Geotech. J.*, 54, 117–127.
- Rogelj, J., den Elzen, M., Höhne, N., Fransen, T., Fekete, H., Winkler, H., ... Meinshausen, M. (2016). Paris agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2°C. *Nature*, 534, 631–639.
- Rosowsky, D.V. (2018). Assessing climate change impacts on hurricane hazards. In C. Murphy, P. Gardoni, R. McKim (Eds.). *Climate Change and Its Impacts, Climate Change Management* (pp. 93–107). Cham, Springer.
- Rupnow, T. (2010). Evaluation of the LA 1 bridge at the Morganza flood control structure (Report No. FHWA/LA.10/11-1TA). Baton Rouge, LA: Louisiana Transportation Research Center.
- Ryan, P. C., Stewart, M. G., Spencer, N., & Li, Y. (2016). Probabilistic analysis of climate change impacts on timber power pole networks. *Electrical Power and Energy Systems*, 78, 513–523.
- Salman, A. M., Li, Y., & Bastidas-Arteaga, E. (2017). Maintenance optimization for power distribution systems subjected to hurricane hazard, timber decay and climate change. *Reliability Engineering & System Safety*, 168, 136–149.
- Sanders, C. H., & Phillipson, M. C. (2003). UK adaptation strategy and technical measures: the impacts of climate change on buildings. *Building Research and Information*, 31(3), 210–221.
- Schwartz, H. G. (2010). Adaptation to the impacts of climate change on transportation. *The bridge*, 40(3), 5–13.
- Seo, D. W., & Caracoglia, L. (2015). Exploring the impact of “climate change” on lifetime replacement costs for long-span bridges prone to torsional flutter. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 140, 1–9.
- Shakesby, R. A., & Doerr, S. H. (2006). Wildfire as a hydrological and geomorphological agent. *Earth-Science Reviews*, 74, 269–307.
- Shen, H. W., Schneider, V. R., & Karaki, S. (1969). Local scour around bridge piers. *Proc. ASCE*, 95(6), 1919–1940.
- Shupe, T., Lebow, S., & Ring, D. (2008). Causes and control of wood decay, degradation and stain (Pub.2703). Baton Rouge, LA: Louisiana Cooperative Extension Service.
- SMHI (2019). Nollgenomgångar, <https://www.smhi.se/klimat/klimatet-da-och-nu/klimatindex/nollgenomgangar-1.22895>
- Soares, P. M. M., Lima, D. C. A., Cardoso, R. M., Nascimento, M. L., & Semedo, A. (2017). Western Iberian offshore wind resources: More or less in a global warming climate? *Applied Energy*, 203, 72–90.
- Song, H., & Lee, S. (2017). Effects of wind and tree density on forest fire patterns in a mixed-tree species forest. *Forest Science and Technology*, 13(1), 9–16.
- Stambaugh, M. C., Guyette, R. P., Stroh, E. D., Struckhoff, M. A., & Whittier, J. B.

- (2018). Future southcentral US wildfire probability due to climate change. *Climate Change*, 147, 617–631.
- Stein, S. M., & Sedmera, K. (2006). Risk-based management guidelines for scour at bridges with unknown foundations (Rep. No. 107). Washington, DC: NCHRP.
- Stein, S. M., Young, G. K., Trend, R. E., & Pearson, D. R. (1999). Prioritizing scour vulnerable bridges using risk. *J. Infrastruct. Syst.*, 5(3), 95–101.
- Stewart, M. G., & Deng, X. (2015). Climate impact risks and climate adaptation engineering for built infrastructure. *ASCE-ASME J. Risk Uncertainty Eng. Syst., Part A: Civ. Eng.*, 1(1), 04014001.
- Stewart, M. G., Val, D. V., Bastidas-Arteaga, E., O'Connor, A. J., & Wang, X. (2014). Climate Adaptation Engineering and Risk-based Design and Management of Infrastructure. In Dan M. Frangopol and Yiannis Tsompanakis (Eds.). *Maintenance and Safety of Aging Infrastructure* (pp. 641–684). London: Taylor and Francis.
- Stewart, M. G., Wang, X., & Nguyen, M. N. (2011). Climate change impact and risks of concrete infrastructure deterioration. *Journal of Engineering Structures*, 33, 1326–1337.
- Stewart, M. G., Wang, X., & Nguyen, M. N. (2012). Climate change adaptation for corrosion control of concrete infrastructure. *Structural Safety*, 35, 29–39.
- Stoffel, M., & Huggel, C. (2012). Effects of climate change on mass movements in mountain environments. *Prog. Phys. Geogr.*, 36, 421–439.
- Stoffel, M., Tiranti, D., & Huggel, C. (2014). Climate change impacts on mass movements - Case studies from the European Alps. *Science of the Total Environment*, 493, 1255–1266.
- Strydom, S., & Savage, M. J. (2017). Potential impacts of climate change on wildfire dynamics in the midlands of KwaZulu-Natal, South Africa. *Climate Change*, 143, 385–397.
- Titus, J. G., & Richman, C. (2001). Maps of lands vulnerable to sea-level rise: modeled elevation along the US Atlantic and Gulf coasts. *Clim. Res.*, 18, 205–228.
- Toll, D. G., Abedin, Z., Buma, J., Cui, Y., Osman, A. S., & Phoon, K. K. (2012). The impact of changes in the water table and soil moisture on structural stability of buildings and foundation systems: systematic review (CEE10-005 (SR90)). Technical Report-Collaboration for Environmental Evidence. Durham: Durham University Library.
- TRB (Transportation Research Board). (2008). Potential impacts of climate change on U.S. Transportation (Special Report 290). Washington D.C.: Committee on Climate Change and U.S. Transportation, Transportation Research Board, National Research Council.
- Torroja, E. & Paez, A. (1949). La Determinacion del Coeficiente de Seguridad en las Distintas Obras, Instituto Tecnico de la Construcción e del Cemento.
- Truong-Hong, L., Laefer, D. F., & Ba, K. L. (2013). Reduction of lateral loads in abutments using ground anchors. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Ground Improvement*. 166(4): 210–221.
- Úbeda, B., Di Giacomo, A. S., Neiff, J. J., Loiselle, S. A., Poi, A. S. G., Gálvez, J. Á., ... Cózar, A. (2013). Potential effects of climate change on the water level, flora and macro-fauna of a large neotropical wetland. *PLOS ONE*, 8(7), e67787.
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). (2015). Adoption of the Paris Agreement (Report No. FCCC/CP/2015/L.9/ Rev.1). Conference of the Parties, Twenty-first Session. Paris: United Nations Framework Convention on Climate Change. <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/109r01.pdf>
- US Army Corps of Engineers. (2006). *Engineering and Design-Ice Engineering (Engineer Manual EM 1110-2-1612)*. Washington, DC: Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers.
- Usman, M. (2016). A study on the enhancing earthquake frequency in northern Pakistan: is the climate change responsible? *Nat. Hazards*, 82, 921–931.
- Van den Hurk, B., Van Meijgaard, E., De Valk, P., Van Heeringen, K. J., & Gooijer, J. (2015). Analysis of a compounding surge and precipitation event in the Netherlands. *Environmental Research Letters*, 10, 035001.
- Van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., ...

- Rose, S.K. (2011). Representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, 109, 5–31.
- Vandamme, M., Zhang, Q., Ulm, F., Roy, R. L., Zuber, B., Gartner, E., & Termkhajornkit, P. (2013, September). Creep properties of cementitious materials from indentation testing: significance, influence of relative humidity, and analogy between C–S–H and soils. In F. Ulm, H. M. Jennings, & R. Pellenq (Eds.). *Proceedings of the Ninth International Conference on Creep, Shrinkage, and Durability Mechanics (CONCREEP-9)* (pp. 48–61). Virginia: ASCE.
- Vicroads. (2015). *Climate change risk assessment*. Victoria: State Government Victoria.
- Viswanadham, B. V. S., Phanikumar, B. R., & Mukherjee, R. V. (2009). Swelling behaviour of a geofiber-reinforced expansive soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 27, 73–76.
- Volkwein, A., Schellenberg, K., Labiouse, V., Agliardi, F., Berger, F., Bourrier, F., Dorren, L. K. A., Gerber, W., & Jaboyedoff, M. (2011). Rockfall characterisation and structural protection – a review. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 2617–2651.
- Wade, N. H., & Davies, G. W. (1993, June). Ground anchors stabilize highway bridge abutments. Paper presented at the third international conference on case histories in geotechnical engineering, St. Louis: MO.
- Wang, X., Stewart, M. G., & Nguyen, M. N. (2012). Impact of climate change on corrosion and damage to concrete infrastructure in Australia. *Clim. Change*, 110(3–4), 941–957.
- Williamson, E. B., & Winget, D. G. (2005). Risk management and design of critical bridges for terrorist attacks. *J. Bridge Eng.*, 10(1), 96–106.
- Willway, T., Baldachin, L., Reeves, S., Harding, M., McHale, M., & Nunn, M. (2008). *The effects of climate change on highway pavements and how to minimize them: Technical report (PPR184)*. Berkshire, UK: TRL Limited.
- Woodworth, M. A. (2013). *Fire hazard assessment for highway bridges with thermal mechanical modeling* (Doctoral dissertation). Retrieved from https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/23683/Woodworth_MA_D_2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Wright, W., Lattimer, B., Woodworth, M., Nahid, M., & Sotelino, E. (2013). *Highway bridge fire hazard assessment* (Report No. 12-85). Blacksburg, VA: Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Wu, D., Deng, X., Mao, J., Mao, W., Ye, Y., Bi, X. (2007). Macro- and microstructures of heavy fogs and visibility in the Dayaoshan expressway. *Acta Meteorol. Sin.*, 21, 342–352.
- Wu, T. [Tien]. H., McKinnell, W. P., III, & Swanston, D. N. (1979). Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska. *Canadian Geotechnical Journal*, 16, 19–33.
- Wu, T. [Tingyeh], Shih, H. J., Li, H. C., Su, Y. F., & Chen, Y. M. (2016). Landslide impact assessment using projection rainfall data from climate change scenario. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 27(5), 729–740.
- Wuttrich, R., Wekezer, J., Yazdani, N., & Wilson, C. (2001). Performance evaluation of existing bridge fenders for ship impact. *J. Perform. Constr. Facil.*, 15(1), 17–23.
- Yilmaz, I., & Bagci, A. (2006). Soil liquefaction susceptibility and hazard mapping in the residential area of Kütahya (Turkey). *Environ. Geol.*, 49, 708–719.
- Youd, T. L. (1993). Liquefaction-induced damage to bridges. *Transportation Research Record*, 1411, 35–41.
- Zevenbergen, L. W., Arneson, L. A., Hunt, J. H., & Miller, A. C. (2012). *Hydraulic design of safe bridges* (Report No. FHWA-HIF-12-018HDS 7). Fort Collins, CO: Ayres Associates.
- Zia, P., Preston, H. K., Scott, N. L., & Workman, E. B. (1979). Estimating Prestress Losses. *Concr. Int.*, 1(6)