FÖRFATTARE
Matts Andersson & Katja Vuorenmaa Berdica, WSP
Christer Persson, KTH

DATUM
2019-11-20

PM: METODIK FÖR SAMHÄLLSEKONOMISK VÄRDERING AV MINSKAD SÅRBARHET – EN FÖRSTUDIE

INNEHÅLL

INLEDNING 2
Bakgrund och syfte 2
Genomförande 2
LITTERATURÖVERSIKT 4
Sårbarhet inom transportforskningsområdet 5
Påverkan av naturkatastrofer på ekonomin 7
Supply chain risk management (SCRM) 8
SLUTSATS OCH REKOMMENDATIONER 9
Problemdiskussion kring sårbarhetsanalyser 9
Sårbarhet i samhällsekonomiska analyser 10
Förslag till fortsatta studier 14
REFERENSER 15

WSP Advisory
402 51 Göteborg
Besök: Ullevigatan 19

T: +46 10 7225000
WSP Sverige AB
Org. nr: 556057-4880
Styrelsens säte: Stockholm
wsp.com

FÖRFATTARE
Matts Andersson & Katja Vuorenmaa Berdica, WSP
Christer Persson, KTH

Inledning

Bakgrund och syfte

I början av 2000-talet blev sårbarhet – och dess motpol robusthet – ett mer konkret begrepp inom transportforskningen (Berdica, K. 2002) och har sedan dess har fått allt större betydelse i en rad olika sammanhang. I samband med järnvägsutredningen för Västlänken utökades de traditionella säkerhetsfrågorna med en robusthetsanalys, i syfte att illustrera Västlänkens roll och funktion som regional transportlänk. Detta tänk införlivades även i arbetet med de sex järnvägsutredningarna för Norrbotniabanan, med framtagning av dokumentet *Robusthetsaspekter och säkerhetskoncept för driftskedet – generella principer och åtgärder i Norrbotniabanan*.

I samband med den vidare utredningen av Norrbottniabanan identifierades ett ”kalkyltekniskt problem” beträffande kvantifiering och värdering av det faktum att den nya järnvägen utgör ett alternativ till Norra stambanan och därmed minskar järnvägstransportsystemets sårbarhet. Problemet kan lyftas till en generell nivå, det vill säga svårigheten att beräkna nyttan av åtgärder som kan leda till minskad sårbarhet, särskilt när de vidtas i system där det finns få eller inga alternativa transportvägar vid eventuella avbrott i ordinarie transportled.

Sårbarhet behandlas inom ett par olika forskningsområden, men det finns idag ingen vedertagen metod för att kvantifiera och värdera den här typen av effekter. Syftet med denna förstudie[1] är att konkretisera problemet och dess ingående komponenter och föreslå ett antal utvecklingsprojekt, för att på sikt kunna hantera robusthetseffekter i den samhällsekonomiska analysen på ett bättre sätt.

Genomförande

Förstudien omfattar huvudsakligen fyra arbetsmoment:

- Genomgång av litteraturen om sårbarhet för avbrott i transportsystem avseende ekonomiska effekter lämpliga att införliva i samhällsekonomiska analyser av infrastrukturinvesteringar och andra åtgärder i transportsystem.
- Workshop med representanter för olika delar av Trafikverket och Näringslivets transportråd för att diskutera ingående moment och kritiska parametrar.[2]
- Analys och syntes av erfarenheter och input, med fokus på förslag till prioriterade utvecklingsprojekt och förhållningssätt (i ASEK och SEB).
- Vetenskapligt granskningsseminarium med ovan nämnda parter samt representanter från akademin.

Vi behandlar underlag och metodik för tre typer av analyser:

1. Kostnad-nytto-analyser för åtgärder vars huvudsakliga syfte är att minska sårbarheten, exempelvis ”minska risken och förebygga skador på transportinfrastrukturen till följd av extremväder och andra yttringar av klimatförändringar” (exempel taget från utvecklingsplanen).
2. Inkludera nyttan av reducerad sårbarhet i kostnad-nytto-analysen för nyinvesteringar. Nyttan består här av redundans i form av ytterligare transportleder/alternativ i systemet.
3. Strategiska sårbarhetsbedömningar av nätverk, exempelvis för att prioritera drift- och underhållsåtgärder.

[1] Denna PM utgör dokumentation för forskningsuppdraget ”Effekter av minskad sårbarhet vid långa avbrott – en förstudie”, TRV 2018/134761.

[2] Transportstyrelsen lämnade sent återbud och MSB (Myndigheten för samhällsskydd och beredskap) kontaktades men kunde inte utse någon representant att närvara vid workshopen.

Förstudien syftar till att föreslå ett antal utvecklingsprojekt för främst analyser av typ 1 och 2, men har även implikationer för analyser av typ 3.

Beräkningsgången för att värdera ett avbrott finns i ASEK:s generella kalkylmodell för samhällsekonomiska sårbarhetskalkyler för klimatanpassning av transportinfrastruktur och kan i korthet beskrivas som följer.

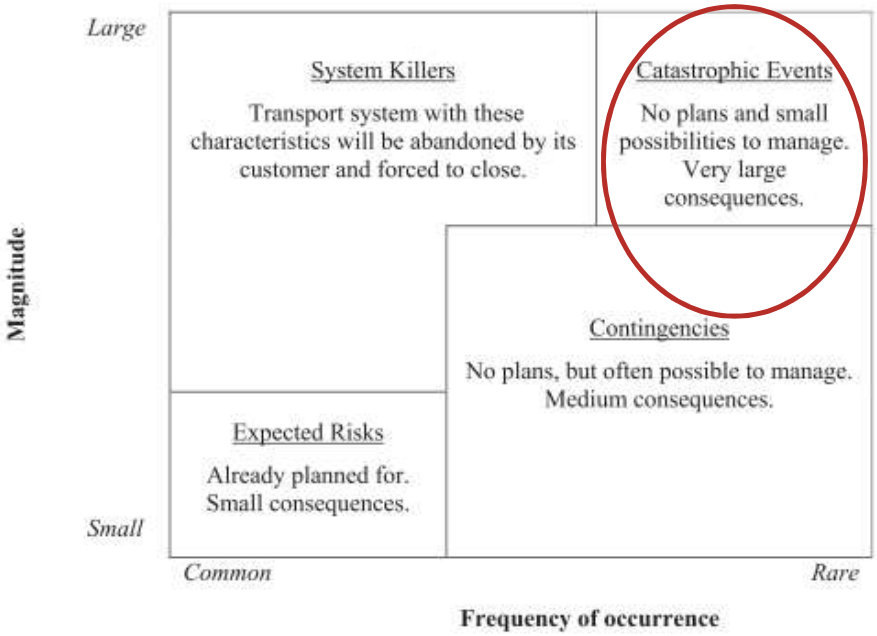
- Utgångspunkten är ett avbrott i någon del av transportinfrastrukturen.
- Nyttan av en åtgärd mäts i form av de kostnader man slipper genom att avbrottet undviks.
- Skadekostnaden får man genom att multiplicera sannolikheten för avbrott med kostnaden givet att avbrottet sker.

Det finns ingen generellt accepterad definition av sårbarhet i transportsystemet. Vi utgår från förslaget till definition som ges i Berdica (2002, p. 119), som är en ofta citerad och representativ del av litteraturen inom området:

> "Vulnerability in the road transportation system is a susceptibility to incidents that can result in considerable reductions in road network serviceability."

Att minska sårbarheten – eller öka robustheten – kan ske på länknivå (åtgärder vidtas för att undvika avbrott) eller systemnivå (alternativa rutter inom ett transportslag eller via andra transportslag).

Förstudien fokuserar på händelser som förekommer med lägre frekvens men med allvarliga konsekvenser, vilka faller inom fälten Catastrophic events och delar av Contingencies i Figur 1. Aktuella skadehändelser (incidents) kan sträcka sig från fysiska haverier eller trafikolyckor som orsakar avbrott på enstaka länkar, till väderrelaterade framkomlighetsproblem i större sammanhängande områden. En gemensam nämnare är dock att de sker mer eller mindre oförutsägbart. Mer vardagliga händelser, som närmast är att betrakta som transporttidsvariation, ingår inte i förstudien. "System killers" ingår inte heller (av anledningen som beskrivs i figuren).



Figur 1. The four types of disturbances. (Andersson et. al. 2017; uppritad av Jonas Flodén)

Ett antal områden har betraktats som särskilt viktiga och har använts som utgångspunkt/sökord för att göra framför allt litteraturstudien mer hanterbar. Förstudien tittar således särskilt på:

- *Järnvägstransporter*
  Metodiken vi till slut föreslår är dock även applicerbar på andra transportslag. För järnväg kan övriga transportslag (särskilt väg) betraktas som alternativ för att vid behov ersätta järnvägstransporterna. Därmed inte sagt att det alltid är möjligt att byta till andra transportslag. Många industrier har byggt in sig i ett visst system (t ex gasol till SSAB i Borlänge) och för vissa varuslag är det inte praktiskt möjligt att skifta.

- *Godstrafik*
  Metodiken vi till slut föreslår är dock till stor del applicerbar även på persontrafik.

- *Trafikstörningar och wider economic benefits (WEI)*
  Detta är de två sistnämnda i ASEK:s[3] fyra kategorier för uppdelning av samhällsekonomisk kostnad på grund av skador på infrastruktur:
  1. Direkt olyckskostnad för trafikanter
  2. Återuppbyggnad av infrastruktur
  3. Trafikstörningar (restidsförlängning vid händelsen och under återställningstiden)
  4. Indirekta effekter utanför transportsektorn (WEI, t ex skador på t ex kommunala ledningssystem eller förluster i produktion/lönsamhet för näringslivet)

- *Effekter givet att ett avbrott har skett*
  Vi har dock med resonemang om beräkning av sannolikheten för avbrott. Avbrott kan bero på exempelvis fysiska haverier eller trafikolyckor som orsakar avbrott på enstaka länkar eller väderrelaterade framkomlighetsproblem i större sammanhängande områden.

Litteraturöversikt

Det finns mycket forskningslitteratur kopplat till sårbarhetsområdet idag och en litteraturöversikt skulle kunna göras mycket omfattande. Syftet här är att diskutera litteratur från forskning om sårbarhet i transportsystem som har relevans för samhällsekonomiska analyser, således görs inga anspråk på att översikten ger en helhetsbild av sårbarhet i transportsystem som forskningsområde. Vi tar upp forskning som är relevant inom tre relativt skilda områden. Det första området är den del av transportvetenskap som studerar sårbarhet för avbrott. Transporter och transportsystemet är dock en del av samhället i stort, forskningsområdet sårbarhet i transportsystemet går därför inte att entydigt avgränsa från andra forskningsområden som studerar sårbarhet i samhället. Vi har därför också studerat viss litteratur inom områden som kan kategoriseras som ”påverkan på ekonomin av naturkatastrofer”[4] samt Supply Chain Risk Management (SCRM) inom logistik. Speciellt det första av dessa två områden är intressant. Delar av det forskningsområdet analyserar de ekonomiska effekterna genom att koppla ihop transportmodeller med regionalekonomiska modeller, det är modellsystem som ligger nära det ideala systemet för samhällsekonomiska analyser av sårbarhet i transportsystemet när det gäller avbrott i större områden.

[3] ASEK 6.1, avsnitt 4.7 *Generell kalkylmodell för samhällsekonomiska sårbarhetskalkyler för klimatanpassning av transportinfrastruktur*, tabell 4.4.

[4] En översättning från engelskans ”economic impact of disasters”

Sårbarhet inom transportforskningsområdet

Sårbarhet i transportsystemet uppstod som begrepp och forskningsfält under andra halvan av nittiotalet och det finns ett antal publicerade artiklar som syftar till att ge en översikt över området. Berdica (2002) är en tidig översikt men är fortfarande aktuell avseende definitioner och frågeställningar som diskuteras. Mattson and Jenelius (2015) är en nyare, synnerligen omfattande översikt. Mattson and Jenelius (2015) tar också upp den karakterisering av sårbarhet som används i denna PM, nämligen att sårbarhet avser händelser som är sällan förekommande (låg frekvens, eller sannolikhet) och som har betydande negativa konsekvenser. Detta har stor betydelse för samhällsekonomiska analyser avseende sårbarhet.

Generellt kan man säga att det finns två olika angreppsätt inom studier av sårbarhet i transportsystem (Mattson L-G., and Jenelius E., 2015). Det första är vad som kan kallas topologisk sårbarhetsanalys av transportnätverk, där transportnätverken studeras på ett tämligen abstrakt sätt med hjälp av grafteori. Det andra angreppssättet kan kallas systembaserad sårbarhetsanalys av transportnätverk, där transportnätverk ges mer konkreta egenskaper av det slag som används inom traditionella transportmodeller genom att länkar i så hög grad som möjligt representeras av sträckor, restider och kostnader som överensstämmer med fysiska transportnätverk. För att kunna lägga ut trafik realistiskt på nätverket används här ofta sedvanliga utbuds- och efterfrågemodeller. Syftet med dessa sårbarhetsanalyser är inte modellutveckling i sig, utan att studera aspekter av sårbarhet. Därför ligger de transportmodeller som använts i de publicerade studierna tämligen nära de modellsystem som används för sedvanliga samhällsekonomiska analyser, vilket är en fördel när det gäller möjligheterna att införliva forskningsresultat i de verktyg och analysmetoder som används av planeringsmyndigheter.

Vi tar inte upp den topologiska typen av sårbarhetsanalysen mer här. Vår bedömning är att indikatorer för sårbarhet som tas fram inom detta område ligger tämligen långt från applicerbarhet i samhällsekonomiska analyser. Det är dock värt att nämna att enligt Mattson and Jenelius (2015) har majoriteten av vetenskapliga sårbarhetsanalyser som behandlar kollektivtrafik utförts som topologiska sårbarhetsanalyser. Detta på grund av att det krävs tämligen avancerade modellsystem för att korrekt kunna studera sårbarhetseffekter för kollektivtrafik. För kollektivtrafik gäller alltså inte fördelen som konstaterades i stycket ovan om att sårbarhetsanalyser rättvisande kan utföras på modellsystem som ligger nära de som används idag av planeringsmyndigheter. Försvårande i detta sammanhang är en studie av Cats och Jenelius (2014) som studerade sårbarhet i kollektivtrafiken i Stockholm. Slutsatsen där var att betweenness centrality”[5], som är ett topologiskt mått för sårbarhet, är mindre lämpligt för att beskriva så kallad ”link importance”, vilket mäter ökningen av den totala restiden i transportnätverket efter ett avbrott och är ett relevant mått i en samhällsekonomisk analys. Det innebär att det finns oklarheter om relevansen av topologiska sårbarhetsanalyser för kollektivtrafik. Detta torde generellt vara ett viktigt område för vidare forskning.

[5] Den klassiska definitionen av 'betweenness centrality' gavs av Freeman (1977) för grafer eller nätverk och kan formuleras för en nod eller en länk. För en länk är betweenness centrality andelen av de kortaste rutterna (shortest paths) i ett nätverk som passerar länken, betweenness centrality bildas på motsvarande sätt för en nod.

Forskningsområdet ”systembaserade sårbarhetsanalyser av transportnätverk” ligger närmare direkta tillämpningar för samhällsekonomiska analyser än de topologiska analyserna. Med det sagt så går det också att konstatera att användning i samhällsekonomiska analyser inte är fokus inom litteraturen för den systembaserade sårbarhetsanalysen. Med detta avser vi analyser som använder välfärdsmått som indikatorer för effekter av ett avbrott[6]. Särskilt gäller det för den tidigare litteraturen inom området, där kunde vi enbart hitta en artikel om sårbarhet och samhällsekonomiska analyser, nämligen konferensbidraget Husdal (2004). Den artikeln efterfrågar att sårbarhetsaspekter bör införlivas i samhällsekonomiska analyser inom transportområdet och innebär egentligen inte någon början på ett ramverk för att de facto göra sådana samhällsekonomiska analyser. Senare litteratur inom området visar dock på ett gynnsammare läge. Exempel på artiklar som explicit använder välfärdsmått, och därmed är en direkt grund för samhällsekonomiska analyser, är Jenelius och Mattsson (2015) samt Cats och Jenelius (2014). Den förstnämnda artikeln presenterar ett ramverk, inklusive tillämpning på det svenska vägnätet, för samhällsekonomiska sårbarhetsanalyser för väg. Det använda välfärdsmåttet i ramverket var den så kallade compensating variation (CV). I tillämpningen översattes det till summerade restidsvärden (mer precist antogs CV vara proportionellt mot summerade restidsökningar). I Cats och Jenelius (2014), som studerade kollektivtrafik, definieras *värdet av robusthet* (mot avbrott) som passagerarnas nytta (welfare) vid avbrott i ett utökat kollektivtrafiknätverk jämfört med basnätverk. På ett liknande sätt definierade de också *värdet av redundans* i nätverkstermer i from av ett välfärdsmått. Jenelius och Mattsson (2015) är ett ramverk som ligger nära samhällsekonomiska analyser som idag görs av planeringsmyndigheter, medan Cats och Jenelius (2014) är intressant för att de definierar välfärdsmått som kan användas för inriktning och principer inom planering.

Huvudintresset inom området för systembaserade sårbarhetsanalyser ligger på att ta fram index på sårbarhet och att använda dem för att identifiera transportlänkar som är sårbara. Huvudfokus inom området har varit avbrott på länkar, men effekter vid avbrott över ett område har också studerats. Jenelius (2009) är ett exempel på en sådan studie. Ett exempel på sårbarhetsindex ges av Murray-Tuite och Mahmassani (2004), vilka föreslog ett index baserat på trafikflöde, länkkapacitet, restid och tillgänglighet till alternativa rutter. Ett index som är relevant i samhällsekonomiska analyser är förslaget från Jenelius et al. (2006) om att använda generaliserad reskostnad, se även Chen et al. (2006).

Med anledning av att samhällsekonomiska beräkningar inte har varit ett uttalat syfte inom området för systembaserade sårbarhetsanalyser, så har inte heller det uppenbara sättet att mäta de samhällsekonomiska effekterna av sårbarhet använts, nämligen att koppla en modell eller ett verktyg för samhällsekonomiska beräkningar till en transportmodell. En sådan utökning av de nuvarande samhällsekonomiska beräkningarna vore dock omfattande, inte minst beräkningsmässigt, se avsnittet *Sårbarhet i samhällsekonomiska analyser* nedan. En indikation på detta är också att tillämpningen i ramverket presenterat av Jenelius och Mattsson (2015) använder en förenklad transportmodell som enbart består av ruttval för biltrafik. Ett alternativ till detta är att införliva sårbarhet på ett enklare sätt, genom så kallade effektsamband. En intressant artikel för detta syfte ges i El-Rashidy och Grant-Muller (2014) som estimerar link importance som en funktion av attribut för avbrottslänken. Jenelius (2009) använder också regressionsmodeller i ett liknande syfte.

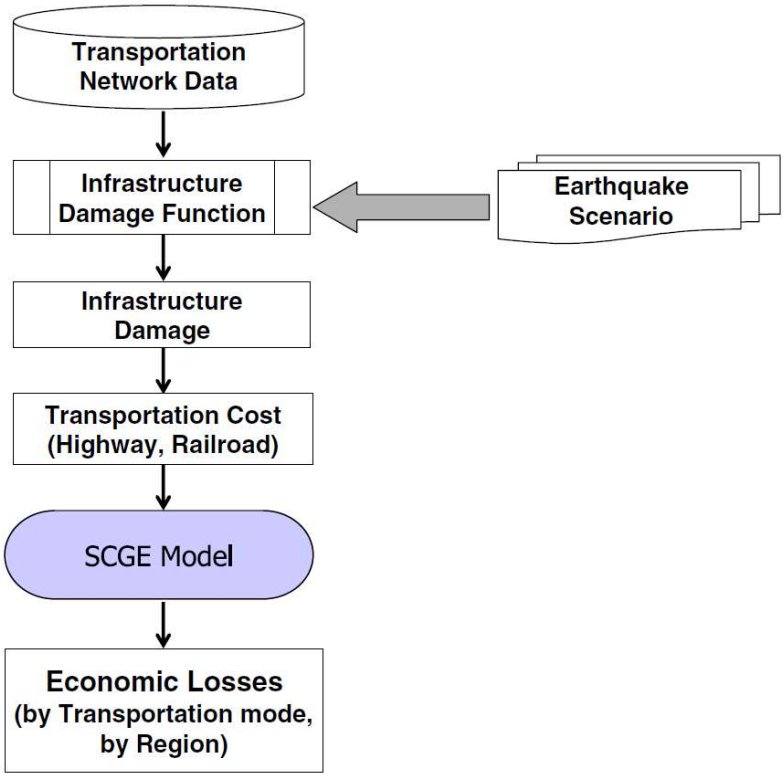
[6] Gränsen för om en indikator är ett välfärdmått, enligt gängse ekonomisk terminologi, är inte lätt att bestämma. Till exempel kan link importance, ökningen av den totala restiden i systemet efter ett avbrott, enkelt konverteras till det som kan sägas vara det enklaste välfärdsmåttet inom transportområdet, nämligen restid värderad i pengar.

Påverkan av naturkatastrofer på ekonomin

I forskningsområdet ”påverkan av naturkatastrofer på ekonomin” studeras ekonomiska effekter av naturkatastrofer, typiskt jordbävningar. Effekterna mäts ofta i termer av samhällsekonomiska nyttoförändringar i form av konsumentöverskott eller liknande välfärdsmått. Området är intressant eftersom det ger ett antal exempel där transportmodeller kopplas ihop med regionalekonomiska modeller i syfte att utföra, åtminstone viktiga delar av, en samhällsekonomisk analys som berör avbrott i transportsystemet inom ett större geografiskt område.

I tidigare forskning inom området användes ofta så kallade input-outputmodeller (Gordon et al.,1998; Toyoda och Kochi, 1997) för att modellera effekterna på den regionala ekonomin. Ett svenskt exempel på en sådan modell som använts inom infrastrukturplanering är den så kallade Rapsmodellen. Nyare studier har använt så kallade Spatial Computational General Equilibrium (SCGE) modeller som regionalekonomisk modell. En intressant sådan studie är Tatano and Tsuchiya (2007), se även (Tsuchiya, et al., 2007), som analyserar de ekonomiska effekterna av jordbävningen i den japanska regionen Niigata-Chuetsu 2004. Figur 2 visar schematiskt kopplingen mellan transportmodell och SCGE i den studien.

Ett resultat från den studien var att de geografiska spridningseffekterna var betydande. Modellen delade in Japan i nio regioner, varav Niigata-Chuet utgjorde en region. Enbart 20 procent av de totala ekonomiska effekterna av jordbävningen uppkom i den drabbade regionen, resterande 80 procent uppstod i övriga regioner. Det visar bland annat på betydelse av att ha en geografiskt indelad modell för ekonomin (”spatial” i SCGE).



Figur 2. The process of economic loss estimation due to transportation network disruption from earthquake disasters. (Tatano and Tsuchiya 2007)

Ett exempel på en SCGE modell som har använts i infrastrukturplanering i Sverige är Strago, vilken kan kopplas ihop med godstrafikmodellen Samgods. Dessa två modeller skulle tillsammans kunna användas för att göra liknande studier om exempelvis naturkatastrofer (såsom stormen Gudrun eller vinterproblem 2009-2010), eller med andra ord, samhällsekonomiskt inriktade sårbarhetsanalyser.

SCGE-modeller har sitt ursprung i tidigare mikroekonomiska CGE modeller. Dessa omfattade i typfallet hela länder och tog inte hänsyn till geografisk lokalisering av konsumenter och företag. SCGE modellering som delar upp ekonomin i ett antal regioner kan sägas starta med New Economic Geography (NEG) som definieras av det som brukar kallas Anas-Krugman-Fujita modellen (Anas, 1992; Fujita och Krugman, 1995; Fujita och Nobuaki, 2001). I en SCGE modelleras hushåll som nyttomaximerare, ofta som ett typhushåll per region. Företag modelleras oftast som kostnadsminimerande monopolister under konkurrens och det finns ett kontinuum av företag inom varje kombination av region och näringslivssektor. Det finns undantag till detta, exempelvis representerar Tatano and Tsuchiya (2007) företag som vinstmaximerare med ett typföretag per region och sektor. I klassiska NEG-modeller representeras transporter med hjälp av den så kallade isbergsmetoden, vilken innebär att en varas värde ”smälter bort” i proportion till transporttidens längd. Isbergsmetoden har fördelen att den är enkel i det att det behövs ingen transportsektor som utför transporterna. Tatano and Tsuchiya (2007) hanterar godstransporter med hjälp av isbergsmetoden. Nyare SCGE modeller, som till exempel Strago (Sundberg, 2009), hanterar dock ofta transporter med hjälp av en explicit inkluderad transportsektor. Hushållen i SCGE erbjuder sin arbetskraft till företagen, vilket innebär att det finns en arbetsmarknad i SCGE modellerna, en arbetsmarknad som kan vara begränsad lokalt till regionerna. Hushållen äger också företagen vilket ger upphov till en kapitalmarknad. Pris-, löne- och räntebildning sker endogent i modellen genom jämviktsvillkor avpassade för respektive marknad. Jämfört med input-outputmodeller är den stora fördelen för SCGE att de kan modellera substitution i ekonomin mellan marknader.

En kritik, utifrån ett sårbarhetsperspektiv, som kan riktas mot modellering av transporter i detta forskningsområde, är att de tenderar att missa substitution mellan transportslag vid avbrottet. Exempelvis modellerade Tatano and Tsuchiya (2007) tjänsteresor som resor som enbart skedde med höghastighetståg, och att gods endast transporterades på väg.

Supply chain risk management (SCRM)

De två hittills beskrivna forskningsområdena har det gemensamt att de fokuserar på sårbarhet i form av effekter och konsekvenser *när* en avbrottshändelse har inträffat. För att kunna värdera sårbarhet i samhällsekonomiska analyser måste dock sannolikheten för att ett avbrott inträffar vara känd och skattad. SCRM är ett forskningsområde inom logistik som arbetar med ett riskbegrepp som i princip kan översättas till sannolikheten för att en avbrottshändelse inträffar. Området är dock inriktat mot hur organisationer och företag kan *hantera* risk mer än att faktiskt mäta risker. Dessutom konstateras i en översikt över SCRM av Heckmann et al. (2015) att 82 procent av studierna i översikten inte hade någon explicit definition av risk. Vår bedömning är att forskningsområdet i nuläget har tämligen låg potential avseende sårbarhet och samhällsekonomiska analyser.

FÖRFATTARE
Matts Andersson & Katja Vuorenmaa Berdica, WSP
Christer Persson, KTH

Slutsats och rekommendationer

Problemdiskussion kring sårbarhetsanalyser

Den övergripande uppfattningen är att det finns ganska många projekt på gång om beräkningsmetoder, effektsamband och värderingar beträffande "vanliga", vardagliga förseningar. Utmaningen är att adressera mer sällsynta och längre avbrott i transportinfrastrukturen. Aktuella skadehändelser kan sträcka sig från fysiska haverier eller trafikolyckor som orsakar avbrott på enstaka länkar, till väderrelaterade framkomlighetsproblem i större sammanhängande områden. En gemensam nämnare är dock att de sker mer eller mindre oförutsägbart. Den påföljande konsekvensens storlek styrs av drabbad trafikvolym, skadans varaktighet (tid) och utbredning (rum) samt om det finns några tillgängliga alternativa rutter eller färdmedel, dvs. systemets redundans.

Vid stopp i järnvägssystemet är det inte säkert att det går att byta till vägtransport. Utöver restidsförlängning kan effekterna för persontåg även omfatta helt uteblivna resor, när det inte går att få fram tillräckligt många ersättningsbussar. Vad godståg beträffar kan vissa (oftast tyngre/skrymmande) varuslag inte transporteras annat än på järnväg. Vidare har många industrier byggt in sig i ett visst system (t ex gasol till SSAB i Borlänge), vilket innebär att det inte är praktiskt möjligt att ta emot motsvarande antal lastbilar i stället för ordinarie tågleverans.

För godstransporter är tillförlitlighet, att leveranser kommer fram i tid, centralt. Det finns dessutom en dominoeffekt som är svår att fånga: en restidsförlängning för godset påverkar in-/utleveranser, som kan leda till produktionsstopp/-förluster, som i sin tur påverkar kundrelationer och övergripande lönsamhet på sikt. Finns det rent av ett samband mellan (bristande) robusthet och företagens val av godstransportlösning? Överlag känner branschen tveksamhet till hur godstransporter värderas och hanteras i den samhällsekonomiska analysen.

Direkta trafikstörningseffekter i form av restidsförlängning på grund av lägre hastighet/köbildning eller längre resväg vid omledning kan beskrivas på ett tämligen rättframt sätt och värderas med hjälp av etablerade tidsvärden. Det är vanskligare att mäta och värdera helt uteblivna transporter och/eller följdeffekter (WEI) på produktion och lönsamhet utanför transportsektorn. En möjlig utgångspunkt till metodik för att få grepp om näringslivets samlade kostnader kopplat till försenade godstransporter kan vara Lundberg (2006). Där intervjuades ett antal transportchefer om hur stor andel av deras transporter som blev försenade och vilken merkostnad som därmed uppstod. En tanke kan vara att bygga vidare på detta och utöka/komplettera den företagsekonomiska konsekvensbeskrivningen som sedan några år tillbaka ingår som en del i Trafikverkets Samlade effektbedömning (SEB).

På nyttosidan för järnvägsinfrastrukturutbyggnader åberopas ofta minskad sårbarhet i form av ökad redundans, i synnerhet för godstrafik. Detta gäller vid såväl större investeringar (exempelvis tunneln genom Hallandsåsen eller Norrbotniabanan) som åtgärdsvalsstudier på mindre järnvägssträckor. Kännedom om systemet gör det möjligt att kvantifiera effekten givet att avbrottet sker men analysen begränsas till hypotetiska resonemang på grund av bristande information om sannolikheten för att den nya sträckningen alls kommer att användas för omledning av trafiken i skarpt läge.

Att få ett bättre grepp om sannolikheterna för avbrott är en central del för att hantera sårbarhet i den samhällsekonomiska kalkylen. Två viktiga kategorier av skadehändelser, där sannolikheten för avbrott förväntas öka med tiden, är fysiska haverier (åldrande anläggningar) och väderrelaterade skador (pga. klimatförändringar). Det är inte heller en fråga om ren frekvens utan sannolikheten behöver beskriva hela kedjan ”sannolikhet för att en viss händelse inträffar och leder till ett avbrott av en viss längd”.

Det kan finnas en problematik i att det underlag som behövs för vårt eget säkerhets- och beredskapsarbete innebär ett utpekande av transportsystemets svagaste punkter för en eventuell antagonist. I ljuset av den ökade förekomsten av olika typer av infrastrukturattentat i Europa är detta en problematik som inte kan bortses ifrån. Man bör därför i vissa fall göra en avvägning mellan behovet av gedigna och transparenta underlag och risken för användning vid terrorattentat och krig. Vår bedömning är dock att det inte är så relevant för de studier vi rekommenderar i denna förstudie:

- Problematiken gäller framförallt strategiska sårbarhetsbedömningar av nätverk (det vi kallat typ 3-studier, det vill säga inte det vår studie är inriktad mot).
- När det gäller antagonistiska orsaker till sårbarhet är sannolikt systembaserade bedömningar mer lämpade än sannolikhetsbaserade bedömningar (Oakes et al, 2018). Dessa är då ett komplement till vår mer sannolikhetsbaserade metodik.
- Syftet med de större terrorattentat vi sett i Europa har varit att döda och skada människor, inte att påverka transportsystemets funktion i sig.

Sårbarhet i samhällsekonomiska analyser

Vi kan inte förutsäga när ett avbrott inträffar, däremot kan vi möjligen skatta sannolikheten för att en viss typ av avbrott inträffar under en given tidsperiod. Därför kommer nyttodelen av en samhällsekonomisk beräkning innehållande sårbarhet för avbrott, oavsett hur den beräknas, att härledas ur differenser av förväntade (indirekta) nyttor:

(1) $$E(V) = \sum_i p_i V_i$$

Där p_i är sannolikheten att händelse *i*, typiskt sett ett geografiskt specifikt avbrott, inträffar och V_i är nyttan, vilket lite slarvigt kan översättas med konsekvensen.[7] Om vi låter ett visst *i* symbolisera att inget avbrott föreligger så ryms nyttodelen i nuvarande typ av samhällsekonomiska beräkningar helt i detta specifika *i*. Att införliva sårbarhet i nuvarande samhällsekonomiska beräkningar kan alltså ses som en utökning av nuvarande beräkningar. Om de (indirekta) nyttorna V_i översätts med värdet för konsekvenserna av ett avbrott, känner vi i termerna $p_i V_i$ också igen karakteriseringen av sårbarhet i att det gäller avbrott som förekommer sällan men med större konsekvenser. Sannolikheterna p_i kommer alltså att vara låga och värdet av konsekvenserna V_i bör vara tämligen höga.

Vi kan dela in orsakerna till att inkludera sårbarhet i samhällsekonomiska beräkningar i:

1. att avgöra om sårbarhetsåtgärder bör genomföras, och
2. att ge mer rättvisande samhällsekonomiska beräkningar genom att inkludera sårbarhetsaspekter i analysen av åtgärder som inte är sårbarhetsåtgärder, det vill säga alla typer av åtgärder som man idag räknar på i samhällsekonomiska analyser inom transportområdet.

Det två orsakstyperna ställer olika krav. För kalkyler av typ 1 avgörs lönsamheten av nivån på sannolikheten att avbrott inträffar i relation till nyttovinsten av åtgärden. Om sannolikheten för ett avbrott är tillräckligt låg kommer ingen realistisk nyttovinst att kunna motivera kostnaden för åtgärden i fall där åtgärden minskar de negativa konsekvenserna av ett avbrott. Om åtgärden påverkar själva sannolikheten för avbrott, så gäller att om den ursprungliga avbrottssannolikheten för avbrott är tillräckligt låg så kan åtgärden inte motiveras samhällsekonomiskt ens om åtgärden helt raderar ut sannolikheten för avbrott. I dagsläget vet vi relativt lite om hur stora sannolikheterna för

[7] Summeringen i ekvation (1) är egentligen en integral över sannolikhetsfördelningen över avbrottshändelser, vilken troligen är kontinuerlig över viktiga dimensioner. I en Monte-Carlo simulering av den fördelningen skulle vi få en summering enligt (1). Dock är det en summering av många nödvändiga summeringar i simuleringen, vilket visar på beräkningsintensiteten som uppstår när sårbarhet inkorporeras i samhällsekonomiska beräkningar.

avbrott är. Det är därför ett viktigt område för kommande studier[8], om sårbarhet ska inkluderas i samhällsekonomiska beräkningar och analyser. Vi kan också konstatera att det troligtvis behövs studier om avbrottssannolikheter för att komma med ett underbyggt svar på frågan om det är värt att inkludera sårbarhet i samhällsekonomiska beräkningar, åtminstone avseende punkt 1 ovan. Typ 1 handlar om samhällsekonomiska analyser av åtgärder som syftar till att minska sårbarhetsproblem. Det innebär troligen relativt hårda krav på nyttovinster av åtgärderna för att motivera kostnaderna, jämfört med typ 2. Jenelius och Mattsson (2015) drar slutsatsen:

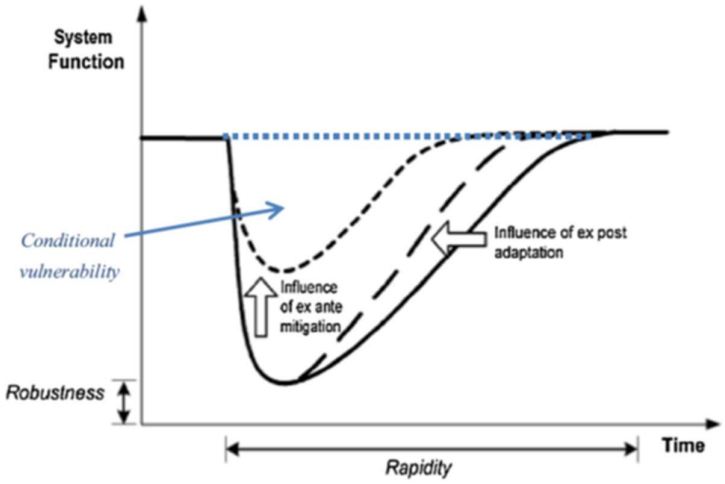
"… Therefore we believe that resource allocation for reducing vulnerability is more an issue of prevention and preparedness for quick mitigation and restoration than redundancy-providing but expensive infrastructure investments."

Att åtgärder som förebygger och mildrar konsekvenserna är en bättre strategi än dyrare nyinvesteringar i väginfrastruktur i syfte att öka redundansen synes rimligt om syftet enkom är att minska sårbarheten. Analyser enligt punkt 2 ovan, det vill säga inkludera sårbarhetsnyttor kalkylerna tillsammans med andra nyttor, torde dock fortfarande vara motiverade. Sårbarhetsnyttan kan vara viktig även om den i sig inte räcker för att motivera åtgärden. Inkludering av sårbarhet ger då en mer realistisk rangordning av åtgärder. Det kan också vara så att det motsatta gäller, det vill säga att minskad sårbarhet förs fram i debatten som en viktig motivering för en åtgärd, men att kalkylerna visar att denna nytta är ringa. Oavsett om viktiga sårbarhetsnyttor bortses ifrån eller om sårbarhetsnyttorna överdrivs är rediga kalkyler viktigt.

När det gäller avbrottssannolikheter lämpliga att använda i samhällsekonomiska beräkningar finns det två allmänna aspekter som är värda att ta upp. Den första är att eftersom, definitionsmässigt i sårbarhetsfrågor, sannolikheterna är små så blir det empiriska underlaget per automatik begränsat. Det försvårar estimeringen av avbrottssannolikheter. Den andra aspekten är att för sårbarhetsåtgärder som syftar till att minska sannolikheten för ett avbrott behöver det som i Trafikverkets terminologi kallas för effektsamband skattas, mellan olika typer av åtgärder och avbrottssannolikheter. Att ta fram sådana effektsamband innebär ytterligare påfrestning på det begränsade empiriska underlaget.

Ett fenomen som inte direkt syns i formel (1) ovan är att tiden för återställning och återuppbyggnad av transportsystemet har stor betydelse för storleken på nyttoförlusten vid ett avbrott och därmed för nyttoförändringar för sårbarhetsåtgärder och sårbarhetsaspekter. Figur 3 visar schematiskt detta på ett tydligt sätt. Den heldragna linjen visar transportsystemets funktionsnivå, med utgångspunkt full funktionsnivå i början av tidsaxeln. Vid avbrottet förlorar systemet snabbt nästan hela sin funktion, för att under återuppbyggnadstiden återgå successivt till full funktion. Nyttotermerna V_i i ekvation (1) ovan beror alltså på varaktigheten för avbrottet, vilket antyder att framtagande av effektsamband för varaktigheten kan ske med hjälp av varaktighetsanalys (s.k. duration models). De streckade linjerna visar också inverkan av förebyggande (ex-ante) sårbarhetsåtgärder innan avbrottet och åtgärder för att underlätta för trafik och transporter under (ex-post) återuppbyggnadstiden. Att funktionskurvan är asymmetrisk med en successiv och inte en abrupt återgång till full funktion förklaras av att berörda invånare och företag inte väntar till dess att det fysiska transportsystemet är fullt återuppbyggt, utan anpassar sig genom att successivt hitta nya res- och transportmöjligheter, börja arbeta hemifrån och liknande.

[8] Nelldal (2013) är ett tämligen sällsynt exempel på en studie av större trafikavbrott på järnväg under en längre period, 2000-2013. Studier av detta slag är troligen nödvändiga för att analysera sannolikheter för avbrott. I dagsläget förekommer ingen systematisk datainsamling av uppgifter om trafikavbrott av planeringsmyndigheter inom transportområdet.



Figur 3. Effects of decision-making on resilience (McDaniels et al. 2008)

I dagens samhällsekonomiska analyser för nyinvesteringar inkluderas oftast enbart effekter inom transportsystemet (tidsvinster, operatörseffekter mm) samt externa effekter (utsläpp, buller mm). Det finns två motiv till detta:

i) Samma nytta uppstår på flera ställen (transportsystemet, arbetsmarknaden, bostadsmarknaden mm). Att addera nyttan på exempelvis arbetsmarknaden till nyttan på transportmarknaden skulle alltså innebära dubbelräkning. Man måste då välja var man mäter, och transportsystemet har visat sig vara det bästa stället att mäta.

ii) Att mäta nyttan på transportmarknaden innebär att man inte fångar alla effekter, men effekterna som inte fångas på de andra marknaderna är oftast små relativt den totala nyttan.

Effekterna på den omkringliggande ekonomin har kallats vid många namn: dynamiska effekter, regional utveckling mm. Numera är det mest använda begreppet wider economic impacts, WEI (Se Andersson et al 2015 för en genomgång av hur WEI kan beräknas). Man menar oftast ungefär samma sak med begreppen, en tydlig skillnad är dock att WEI endast inkluderar de effekter som inte fångats i transportmarknadskalkylen.

Om WEI antas vara små vid en viss typ av nyinvesteringar är det rimligt att anta att de är små vid avbrott på dessa länkar. Därmed torde vi i princip kunna använda dagens system för samhällsekonomiska beräkningar, det vill säga en traditionell utbuds- och efterfrågemodell för trafik kompletterat med ett verktyg som sammanställer de samhällsekonomiska effekterna från utdata ur trafikmodellerna för dessa analyser. För effekter på systemviktiga länkar (vilket får definieras) och på större områden bör man dock beräkna WEI.

Det finns några saker att betänka i frågan om att använda dagens system för samhällsekonomiska beräkningar för sårbarhet som innebär avbrott på enskilda länkar. Att utvidga dagens beräkningar enligt formel (1) innebär att göra många modellkörningar där det i dagens samhällsekonomiska beräkningar enbart görs två körningar, ett utredningsalternativ och ett jämförelsealternativ. Speciellt gäller det för beräkningar enligt punkt 2 ovan, i och med att en ny väg eller järnväg kan förbättra redundansen vid avbrott på ett potentiellt mycket stort antal andra länkar i trafiknätverken. Om vi begränsar sårbarhetsanalysen till en region så består trafiknätverken i samtliga dagens regionala modeller av flera tiotusentals länkar som är kandidater för avbrott. För att begränsa antalet modellkörningar kan det vara värt att studera möjligheterna att använda topologiska sårbarhetsindex eller lätt tillämpbara index från de tidigare nämnda systembaserade sårbarhetsanalyserna för att begränsa antalet kandidatlänkar för avbrott. Ett ytterligare alternativ som kan vara värt att studera för att minska beräkningsintensiteten är att estimera effektsamband för de samhällsekonomiska effekterna, liknande de regressioner som gjordes av Jenelius (2009) samt El-Rashidy och Grant-Muller (2014). Viktigt i sammanhanget är även tidigare nämnda svårigheter att göra sårbarhetsanalyser för kollektivtrafik utan stöd av avancerade modellsystem.

Det tidigare resonemanget avsåg analys av sårbarhet vid avbrott på enskilda länkar i transportnätverken. Vid avbrott i transportnätverket inom ett större område går det inte att betrakta tillgänglighetsförsämringen för berörda invånare och företag som marginell. Det innebär att WEI i den omgivande ekonomin kan bli betydande och måste inkluderas. Tatano and Tsuchiya (2007), visade också exempel på att spridningseffekterna till omgivande regioner kan stå för en större del av de totala ekonomiska effekterna än den region som drabbades av avbrottet. För sådana samhällsekonomiska analyser är läget relativt bra. De modellsystem som har använts i vetenskapliga studier (transportmodell kopplad till SCGE) finns i landet i form av Samgods (godstrafikmodell) och Strago (SCGE), vilka båda har använts i planeringssammanhang. Strago ligger bra till jämfört med de SCGE som har använts i vetenskapliga studier för att undersöka ekonomiska effekter av naturkatastrofer. Strago har 26 sektorer medan de vetenskapliga studierna vi studerat har använt modeller med cirka tre sektorer. De sektoriella spridningseffekterna till den omgivande ekonomin är minst lika viktiga att modellera som den geografiska spridningen i sig, därför bör 26 sektorer i modellen generellt sett ses som bra jämfört med 3 sektorer. Den kanske största fördelen med Strago är att det är en dynamisk intertemporal modell som har möjlighet att modellera det ekonomiska tidsförloppet efter avbrottet, till skillnad från tidigare använda statiska modeller. Där hanteras tidsförloppet med en modellkörning som ger läget före avbrottet och en körning för läget under avbrottet, ibland kompletterat med en tredje körning för läget efter återuppbyggnadsperioden. Nackdelen med dessa statiska modellkörningar är att mycket starka och troligen orealistiska antaganden måste göras om substitution mellan kapitalmarknaden och arbetsmarknaderna. Strago bör ha möjligheten att undvika eller klara sig med mindre starka antaganden om detta. När det gäller den geografiska upplösningen så har Strago åtta regioner, vilket är samma storleksordning som i de nämnda vetenskapliga studierna. En uppenbar nackdel för kombinationen av Samgods och Strago är att den endast beaktar godstrafik.

Vår bedömning är dock att det skulle vara till fördel i sårbarhetsanalyser att ha en finare geografisk upplösning. Diskussioner med Stragos upphovsman har gett vid handen att arbete med att uppdatera modellen med fler regioner (län eller finare nivå) har en måttlig omfattning och att en finare indelning inte bör innebära några problem vid körning av modellen.

Förslag till fortsatta studier

Utifrån vår genomgång av litteraturen och de behov som finns föreslår vi följande tre studier:

1. Analys av sannolikhet för avbrott och återuppbyggnadstid
2. Analys av hur Strago kan kopplas till Samgods och Sampers när det gäller sårbarhet samt hur man kan inkludera distributionstrafik i dessa analyser.
3. Analys av hur 1 och 2 ovan rent praktiskt ska användas i kalkyler.

Studie 1 innebär en generell studie av sannolikheten för avbrott, dvs. sannolikheten oavsett orsak. Effekten av tidigare händelser kan studeras utifrån bland annat LUPP[9]. För bedömningar av de orsaker som kan tänkas öka i betydelse över tiden (exempelvis klimatrelaterade avbrott eller terror-/krigshandlingar) behöver prognoser göras. Här finns viss (risk)litteratur inom respektive orsaksområde på en övergripande nivå som kan vara till nytta, utmaningen är att på ett bra sätt relatera till just avbrott i transportinfrastruktur. Denna studie är därför av intresse oaktat om/hur sårbarhet kommer att inkluderas i de samhällsekonomiska kalkylerna, eftersom de flesta studier som görs idag räknar på effekter givet ett avbrott. Som vi ser det behövs en studie på totalnivå för att åstadkomma praktisk tillämpning i kalkylerna. Studien av sannolikheten för avbrott kan med fördel börja med en mindre metodstudie, följt av en större huvudstudie. Studien av återuppbyggnadstid ser vi däremot framför oss är en tämligen liten och rättfram sammanställning av återuppbyggnadstiden efter tidigare avbrott. Resultaten från studie 1 skulle komma till användning även om man inte gör studie 2 och 3 då sannolikhetsbedömningar nästan helt saknas på detta område inom den fysiska planeringen.

Studie 2 bör resultera i en publicerbar artikel där forskningen inom området förts framåt. I den bör vårt föreslagna analyssystem presenteras och granskas vetenskapligt. En lucka som vi sett i den tidigare forskningen bör också täppas till: inkludering av distributionstrafik och tjänsteresor samt transportmodellens utformning (gå ifrån fix transportslagsfördelning genom tillgång till alternativa färdmedel). Vi bedömer inte att det är nödvändigt med en förstudie inför studie 2 – den får anses vara genomförd i och med denna PM. Däremot är en lämplig start att börja med att analysera hur stor den totala samhällskostnaden för sårbarhet är, för att i en andra analys analysera effekten av olika åtgärder. Med ”total” menas här oavsett orsak och i hela Sverige. Storleksordningen på denna kostnad kan ge intressanta policyimplikationer i sig: hur förhåller den sig till kostnader för exempelvis transporttidsvariation eller ”vanliga” förseningar? Vilken typ av avbrott orsakar de största samhällskostnaderna?

Studie 3 föreslås konkludera hur den i studie 1 och 2 föreslagna metoden kan tillämpas praktiskt. En stor utmaning här är att analysen måste kunna göras väldigt snabbt för att kunna inkluderas i en samlad effektbedömning. En möjlig lösning kan vara att utifrån steg 1-2 räkna ut en generell formel där kostnaden för sårbarhet (eller nytta av robusthet) görs beroende av ett antal variabler som ändå tas fram i utredningsprocessen. Studie 3 bör också resultera i ett praktiskt förslag för hur resultatet ska redovisas i de samlade effektbedömningarna (SEB:arna). En möjlighet är att göra ett tillägg till Trafikverkets företagsekonomiska konsekvensbeskrivning (FKB) som ingår i SEB:en. Enligt instruktionerna ska en FKB genomföras för alla objekt som i ett inledande analyssteg konstateras vara kopplat till godstransporter. Genom intervjuer ska sedan utvalda företag bedöma sju logistikrelaterade kostnadsdrivare, däribland om den föreslagna åtgärden kan förväntas påverka robustheten och tillförlitligheten i berört transportnätverk.

[9] Systemet Lupp används för att ta fram statistik om punktlighet och störningar. Information finns på Trafikverkets hemsida: https://www.trafikverket.se/tjanster/system-och-verktyg/forvaltning-och-underhall/Lupp-uppfoljningssystem/. Systemet innehåller så mycket data att man för detta syfte inte kan leta förutsättningslöst efter störningar utan måste specificera vilka störningar man letar efter.

Företagen får göra en bedömning av hur stor procentuell förändring åtgärden väntas få på kostnaderna förknippade med den aktuella transportkedjan och även på summan av företagets alla logistikrelaterade kostnader. Det bör inte vara omöjligt att utöver nuvarande fokus på mer vardagliga störningar addera ett sårbarhetsperspektiv i form av uppskattningar av effekter givet ett avbrott.

I inledningen beskrev vi tre typer av sårbarhetsanalyser som är tänkbara:

1. Analyser av åtgärder vars huvudsakliga syfte är att minska sårbarheten på enskilda länkar/noder.
2. Samhällsekonomiska analyser av åtgärder vars huvudsyfte inte är minskad sårbarhet (men där nyttan av minskad sårbarhet på grund av redundans ändå bör inkluderas).
3. Strategiska sårbarhetsbedömningar av nätverk, exempelvis för att prioritera drift- och underhållsåtgärder.

Analyser av typ 1 kräver effektsamband för hur mycket olika åtgärder minskar sannolikheten för avbrott, vilket vi inte studerat i detta projekt. Här finns pågående arbete som våra tre föreslagna studier torde komplettera väl, men vi har som sagt inte studerat detta här. I övrigt bedömer vi att de tre förslagen till fortsatta studier ovan skulle ge ett heltäckande underlag för att inkludera samhällsekonomiska analyser av sårbarhet i planeringen (det vill säga studier av typ 1 och typ 2).

Referenser

Anas, A. 1992. On the birth and growth of cities: Laissez-faire and planning compared. *Regional Science and Urban Economics*, 22(2), 243-258.

Andersson, M., Berglund, M., Flodén, J., Persson, C., Waidringer, J. 2017. A method for measuring and valuing transport time variability in logistics and cost benefit analysis. *Research in Transportation Economics* (66) 59-69.

Berdica, K. 2002. An introduction to road vulnerability – What has been done, is done and should be done. *Transport Policy* (9) 117-127.

Berdica, K., Mattsson, L-G. 2007. *Vulnerability: A Model-Based Case Study of the Road Network in Stockholm.* In Murray, A. T. & Grubesic, T. H. (eds.) "Critical Infrastructure: reliability and vulnerability", pp 81-106, Springer-Verlag.

Cats, O., Jenelius, E. 2014. Dynamic Vulnerability Analysis of Public Transport Networks: Mitigation Effects of Real-Time Information. *Networks and Spatial Economics* 14 (3-4), 435-463.

Chen, A., Yang, C., Kongsomsaksakul, S., Lee, M. 2006. Network-based Accessibility Measures for Vulnerability Analysis of Degradable Transportation Networks. *Networks and Spatial Economics* 7(3), 241-256.

Faturechi, R., Miller-Hooks, E., 2014. Measuring the Performance of Transportation Infrastructure. *Systems in Disasters: A Comprehensive Review*.

Fujita, M., Krugman, P. 1995. When is the economy monocentric? von Thünen and Chamberlin unified. *Regional science and urban Economics* 25(4), 505-528.

Fujita, M., Nobuaki, H. 2001. Intermediate Goods and the Spatial Structure of an Economy. *Regional Science and Urban Economics* 31(1)

Gordon, P., Richardson, H., Davis B., 1998. Transport-related impacts of the Northridge earthquake. *Journal of Transportation and statistics*, May 1998.

Heckmann, I., Comes, T., Nickel, S. 2015. A critical review on supply chain risk–Definition, measure and modeling. *Omega* 52, 119-132.

Husdal J., 2004. Reliability and Vulnerability versus Costs and Benefits. Proc. 2nd Int. Symp. Transportation Network Reliability (INSTR). Christchurch, New Zealand (pp. 180-186).

Husdal, J., Bråthen, S., 2010. *Bad locations, bad logistics? How Norwegian freight carriers handle transportation*. Presented at the 12th World Conference for Transportation Research, WCTR, July11-15, 2010, Lissbon, Portugal.

Jenelius E., 2009. Network structure and travel patterns: explaining the geographical disparities of road network vulnerability. *Journal of Transport Geography* 17(3), 234-244.

Jenelius, E. and Cats, O. 2015. The value of new public transport links for network robustness and redundancy. *Transportmetrica A* 11(9), 819-835.

Jenelius, E., Mattsson, L-G., 2015. Road network vulnerability analysis: Conceptualization, implementation and application. *Computers, Environment and Urban Systems* 49, 136-147.

Jenelius, E., Mattsson, L-G., 2012. Road network vulnerability analysis of area-covering disruptions: A grid-based approach with case study. *Transportation Research Part A* 46(5), 746-760.

Jenelius, E., Petersen, T., Mattsson, L-G., 2006. Importance and exposure in road network vulnerability analysis. *Transportation Research Part A* 40(7), 537-560.

Ludvigsen J., Klæboe R., 2014. Extreme weather impacts on freight railways in Europe. *Natural hazards*, *70*(1), 767-787

Lundberg, S., 2006. *Godskunders värderingar av faktorer som har betydelse på transportmarknaden.* Licentiatavhandling TRITA-TEC-LIC 06-001, Kungliga tekniska högskolan, Stockholm.

Mattsson, L-G., Jenelius, E., 2015. Vulnerability and resilience of transport systems – A discussion of recent research. *Transportation Research Part A* 81, 16-34.

Murray-Tuite, P.M., Mahmassani, H.S., 2004. Methodology for the determination of vulnerable links in a transportation network. *Transp. Res. Rec* 1882, 88–96.

Nelldal, B-L., 2013. *Större trafikavbrott vid Sveriges järnvägar 2000-2013 och dess effekter på transportkunderna*. Intern rapport, KTH Järnvägsgrupp, 2013-07-01.

Oakes, B. D., Mattsson, L-G., Näsman, P. and Glazunov, A. A., 2018 A Systems-Based Risk Assessment Framework for Intentional Electromagnetic Interference (IEMI) on Critical Infrastructures. Risk Analysis, Vol. 38, No. 6.

Sundberg, M. 2009. *Essays on spatial economies and organization*. Doktorsavhandling TRITA-TEC-PHD 09-005, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm.

Tatano, H., Tsuchiya, S., 2008. A framework for economic loss estimation due to seismic transportation network disruption: a spatial computable general equilibrium approach. *Natural Hazards* 44(2), 253-265.

Toyoda, T. and Kochi, A. 1997. Estimation of economic damages in the industrial sector by the great Hanshin-Awaji earthquake. *Journal of Political Economy and Commercial Science*, 176(2): 1–15. (in Japanese)

Tsuchiya, S., Tatano H., Okada N., 2007. *Economic Loss Assessment due to Railroad and Highway Disruptions. Economic Systems Research* 19(2), 147-162.