



CHALMERS



Vattenflöden och stabilitet vid järnvägen

Effekter av skogsavverkning och klimatförändringar

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Samhällsbyggnadsteknik

David Berger & Emil Rydberg

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg 2026

www.chalmers.se

EXAMENSARBETE 2026

Vattenflöden och stabilitet vid järnvägen

Effekter av skogsavverkning och klimatförändringar

David Berger & Emil Rydberg



CHALMERS

Institutionen för ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg 2026

Vattenflöden och stabilitet vid järnvägen
Effekter av skogsavverkning och klimatförändringar
David Berger & Emil Rydberg

© David Berger, 2026.

© Emil Rydberg, 2026.

Handledare: Klas Hansson, Trafikverket
Examinator: Mats Karlsson, Geologi och geoteknik

Examensarbete ACEX20
Institutionen för Arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Chalmers Tekniska Högskola
SE-412 96 Göteborg
Telefon +46 31 772 1000

Omslagsbild: Fiktiv bild på tågurspårning. (Törngren, 2014). Omarbetad bild med tillstånd
(Skapad med Google Gemini 2026).

Skriven i L^AT_EX
Göteborg 2026

Vattenflöden och stabilitet vid järnvägen
Effekter av skogsavverkning och klimatförändringar
David Berger & Emil Rydberg
Institutionen för Arkitektur och Samhällsbyggnadsteknik
Chalmers Tekniska Högskola

Sammanfattning

Skogsavverkning och ett förändrat klimat är idag två betydande faktorer för de hydrologiska processerna gällande ytavrinning och ökande flöden. Det har också visat sig att en förhöjd grundvattennivå kan uppstå i närheten av järnvägsinfrastrukturen i Sverige. Detta examensarbete analyserar avverkningens effekter i samband med extremväder för att utvärdera de konsekvenser som uppstår vid anläggningen ur ett stabilitets- och flödesperspektiv.

För att undersöka effekterna gjordes en litteraturstudie som kompletterades med en fallstudie vilket omfattade en geoteknisk utredning för att bilda en god förståelse kring ämnet. Fallstudien efterliknar ett riskfyllt område där konsekvenserna av extrem väder och skogsavverkning i kombination kan ha omfattande konsekvenser på järnvägsbankens stabilitet.

I rapporten har stabilitetsberäkningar gjorts för att utvärdera ett grundscenario mot tre olika teoretiska scenarier. Det första scenariot speglar långvarig torka med låga vattennivåer. Det andra scenariot representerar en skogsavverkning genom kalhuggning med tillhörande grundvattens-tigning. Det tredje scenariot kombinerar skogsavverkning med ett extremregn där intensiteten blir så hög att det uppstår översvämning mot järnvägsbanken. Resultatet av de stabilitetsanalyser som gjorts visar försämring av stabiliteten i bank och bankområde på upp emot 23 %.

Ur ett flödesperspektiv har rationella metoden tillämpats på ett studieområde längs Västra stambanan utanför Lerum för att analysera flödesförändringarna. Genom att jämföra förhållandet före och efter en fiktiv avverkning visar examensarbetet att flödesökningen kan uppgå till cirka 480 % vid ett 100-årsregn med en varaktighet på 60 minuter.

Nyckelord: skogsavverkning, vattenflöde, stabilitet, klimatförändringar, järnvägsbank, extremregn, erosion, järnväg

Water flows and stability at the railway
Effects of deforestation and climate change
David Berger & Emil Rydberg
Department of Architecture and Civil Engineering
Chalmers University of Technology

Abstract

Deforestation and a changing climate are currently two significant factors for the hydrological processes regarding surface runoff, increasing flows and an elevated groundwater level in the vicinity of the railway infrastructure in Sweden. This thesis analyzes the effects of logging in connection with extreme weather to assess the consequences that arise at the facility from a stability and flow perspective.

To investigate the effects, a literature study was carried out, which was complemented by a case study that included geotechnical investigations to form a good understanding of the subject. The case study area mimics a risky area where the consequences of extreme weather and deforestation in combination can have extensive consequences on the stability of the railway embankment.

In the report, stability calculations have been carried out to evaluate a baseline scenario against three different theoretical scenarios. The first scenario reflects prolonged drought with low water levels. The second scenario represents forest harvesting through clear-cutting with associated groundwater rise. The third scenario combines forest harvesting with extreme rainfall where the intensity becomes so high that flooding occurs towards the railway embankment. The results of the stability analyses carried out show a deterioration of stability in the embankment and embankment area by up to 23%.

From a flow perspective, the rational method has been applied to a study area along the Western Main Line outside Lerum to analyse the flow changes. By comparing the situation before and after a fictitious logging, the thesis shows that the flow increase can amount to approximately 480% in the event of a 100-year rain with a duration of 60 minutes.

Keywords: deforestation, water flow, stability, climate change, railway embankment, extreme rain, erosion, railway

Förord

Detta examensarbete utgör det avslutande momentet i Samhällsbyggnadsteknik, högskoleingenjörsprogrammet vid Chalmers tekniska högskola. Studien genomfördes under vårterminen 2026 i samarbete med Trafikverket.

Vi är glada och tacksamma över det stöd vi tagit del av under arbetets gång, från både Chalmers och utomstående aktörer. Vi vill rikta ett stort tack till vår handledare Klas Hansson från Trafikverket för den konsekventa vägledningen genom hela arbetets gång. Ett stort tack till vår handledare och examinator Mats Karlsson samt Cecilia Ahl, geotekniker på Lerums kommun som bistått med sina enastående kompetenser. Till sist ett stort tack till övriga aktörer som ställt upp och svarat på frågor, försett oss med viktig information och stöttat arbetet. Avslutningsvis vill vi visa vår uppskattning till Chalmers för den framstående utbildning vi genomfört. Tiden på universitetet har inte bara gett oss den tekniska grunden vi står på idag utan även nya vänner och erfarenheter vi bär med oss för resten av våra liv. Med detta arbete sätter vi punkt för vår studietid och ser med stor förväntan fram emot att ta klivet ut i yrkeslivet och påbörja nästa kapitel i vår karriär.

TACK!

David Berger & Emil Rydberg, Göteborg, juni 2026

Beteckningar

Nedan är en lista på beteckningar som har använts under arbetets gång i alfabetisk ordning:

IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
RCP	Representative Concentration Pathways
SGI	Sveriges geotekniska institut
SGU	Sveriges geologiska undersökning
SKS	Skogsstyrelsen
SLU	Sveriges lantbruksuniversitet
SMHI	Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut
TRV	Trafikverket

Symboler & begrepp

Nedan följer de symboler och begrepp som använts i rapporten.

Parametrar

K_f	=	klimatfaktor enligt tabell 3.3
φ	=	avrinningskoefficient [–]

Variabler

Q	=	flöde [l/s]
A	=	yta [ha]
i	=	regnintensitet [l/s · ha]
f_i	=	infiltrationskapacitet [l/(s · ha)]
σ	=	spänning [Pa]
σ'	=	effektivspänning [Pa]
u	=	portryck [Pa]
τ	=	skjuvhållfasthet [Pa]
τ_{mob}	=	skjuvspänning [Pa]

Indata

t_r	=	regnvaraktighet [minuter]
T	=	återkomsttid [månader]

Begrepp

Avrinningskoefficient	Anger hur stor del av totala nederbörden som rinner av på markytan utan infiltration, anges mellan 0 - 1.
Avrinningsområde	Geografiskt område därifrån allt vattnet rinner till en gemensam punkt.
Friktionsvinkel	Mått på en jordarts inre motstånd mot skjuvning, anges i grader.
Hjulströms diagram	Diagram inom hydrologi för att avgöra om sediment, eroderas, transporteras eller deponeras i strömmande vatten.
Hållfasthet	Egenskap hos ett material. Beskriver den största spänningen materialet kan hantera innan det deformeras.
Koncentrationstid	Tiden det tar för vattnet att rinna från det mest avlägsna punkten i ett avrinningsområde till en specifik punkt.
Konflytgräns	Den vattenkvot där en jordart övergår från att vara plastisk till att bli flytande.
Skjuvhållfasthet	Jordens förmåga att motstå inre glidytor och brott när den utsätts för belastning.
Spänning	Den faktiska belastningen. Definieras som kraft delat på area ($\frac{F}{A}$).
Varaktighet	Den tiden ett specifikt regnfall pågår.
Återkomsttid	Ett statistiskt mått på hur ofta ett regn med en viss intensitet och varaktighet förväntas inträffa.

Innehåll

Akronymer	ix
Nomenklatur	x
Figurer	xvii
Tabeller	xix
1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte och frågeställning	1
1.3 Mål	2
1.4 Avgränsningar	2
2 Metod	3
2.1 Litteraturstudie	3
2.1.1 Källmaterial	3
2.2 Fallstudie	4
2.3 Programvaror och verktyg	5
2.3.1 GeoStudio SLOPE/W	5
2.3.2 QGIS och Geodata	5
2.4 Hydrologisk analys genom tillämpning av rationella metoden	6
2.5 Användning av AI	6
2.6 Förenklad beskrivning av arbetsgång	6
3 Teori	7
3.1 Järnväg	7
3.1.1 Bankens utformning, struktur och uppbyggnad	7
3.1.2 Avvattningssystem	9
3.1.2.1 Dimensionering med rationella metoden	9
3.1.2.2 Diken	11

3.1.2.3	Dräneringsledning	11
3.1.2.4	Trummor	11
3.1.3	Krav på säkerhet och stabilitet	12
3.1.3.1	Tryckbank som stabiliserande åtgärd	12
3.1.3.2	Materialegenskapernas påverkan på järnvägsbankens stabilitet	12
3.1.3.3	Säkerhetsfaktor	12
3.1.3.4	Skjuvhållfasthet	13
3.1.3.5	Partialkoefficientmetoden	13
3.1.3.6	Totalsäkerhetsmetoden	14
3.1.4	Bankens egenskaper	14
3.1.5	Vattnets inverkan på järnvägsbanken	15
3.2	Hydrologi	15
3.2.1	Teorin bakom vattenflöden på och i marken	16
3.2.2	Vattnets påverkan på konstruktioner	17
3.3	Erosionsprocesser	18
3.3.1	Faktorer som påverkar erosionsprocesser	18
3.3.2	Säkerhetsklass för erosionsskydd	19
3.3.3	Erosion; nu och i framtiden	19
3.4	Klimatförändringar	21
3.4.1	Framtida klimatscenarier och nederbördsmonster	21
3.4.2	Extremregn	22
3.4.3	Klimatförändringens påverkan på infrastruktur	22
3.5	Skogsavverkning	23
3.5.1	Slutavverkning	24
3.5.1.1	Kalhuggning	25
3.5.1.2	Naturlig föryngring utifrån trädslag	25
3.5.1.3	Etapptvis avverkning inom trakthyggesbruk	25
3.5.2	Genomförande	26
3.5.2.1	Körmönster	27
3.5.3	Avverkningens påverkan på vattnet	27
3.5.4	Avverkningens påverkan i form av förändrad avrinningskoefficient . . .	29
4	Platsbeskrivning	31
4.1	Platsbeskrivning vid Aspen längs västra stambanan	31
4.1.1	Områdesbeskrivning och infrastruktur	31
4.1.2	Topografi, släntgeometri och hydrologiska förutsättningar	31
5	Genomförande	33
5.1	Fallstudien	33
5.1.1	Geoteknisk undersökning	34

5.1.2	Modellering	35
5.1.3	Simulering	35
5.1.4	Arbetsgång modellering	36
5.2	Flödesberäkning	36
5.2.1	Flödesökning till följd av skogsavverkning	36
5.2.2	Beräkning av flöde kopplat till avverkning och 100-års regn	37
6	Resultat	39
6.1	Resultat av flödesberäkningen	39
6.2	Bankens stabilitet	40
6.2.1	Stabilitetsanalys, kombinerad analys	40
6.2.1.1	Analys av säkerhetsfaktor för bankområde med och utan torrskorpa	40
6.2.1.2	Analys av säkerhetsfaktor för enbart bank med och utan torrskorpa	41
6.2.2	Stabilitetsanalys, odränerad analys	42
6.2.2.1	Analys av säkerhetsfaktor för bankområde	42
6.2.2.2	Analys av säkerhetsfaktor för enbart bank	43
7	Diskussion	45
7.1	Tolkning av resultat	45
7.1.1	Studien som ligger till grund för beräkningarna	45
7.1.1.1	Jämförelse med vald studieplats	46
7.1.1.2	Tolkning av resultatet från beräkningen vid Aspenområdet	47
7.1.2	Metoden som grund till stabilitetsberäkningarna	47
7.1.3	Resultatet av stabilitetsanalysberäkningarna	48
7.1.4	Tolkning av resultatet från stabilitetsanalysberäkningarna	49
7.1.5	Jämförelse mellan odränerad-och kombinerad analys	51
8	Slutsats	53
8.1	Slutsats	53
8.2	Rekommendationer och vidare forskning	54
	Källförteckning	55
A	Appendix A	I
B	Appendix B	III
C	Appendix C	VII

Figurer

2.1	Bild över området och sträckan som undersökts. Kartdata (OpenStreetMap, 2026), CC BY-SA 2.0.	4
3.1	Tvärsektion med järnvägstekniska benämningar – bank (Trafikverket, 2015a). .	8
3.2	Benämningar av järnvägskonstruktionens olika delar i skärning. (Trafikverket, 2024).	12
3.3	Ursparning av tåg på Ostkustbanan mellan Iggesund och Hudiksvall. En tydlig erodering av järnvägsbank på grund av kraftigt vattenflöde. Man skimtar även en avverkning i bakgrunden. (Statens haverikommission, 2024), CC BY 2.5 SE .	20
3.4	Illustration över de hydrologiska begreppen. Återgiven med tillstånd. (Svenskt vatten, 2016).	24
3.5	Ettstegvis avverkning i form av kanthuggning. (Skapad med Google Gemini 2026)	26
3.6	Förändring av markvattnet och grundvattnets nivå efter en kalavverkning. En ökning på markvattnet på 1 mm motsvarar 1 liter per m ² markyta. Klotenområdet, Västmanland. (Lundin, 1979). Återgiven med tillstånd.	28
3.7	Vattnets kretslopp innan avverkning. Röda pilar är interception och transpiration från vegetationen. Blå pilar är grundvattenbildning och ytavrinning. (Skapad av Google Gemini 2026).	29
3.8	Avverkad skog; här är grundvattennivån högre och marken hårt packad. Detta ger en större ytavrinning och högre flöde. (Skapad av Google Gemini 2026). . .	29
3.9	Graf som visar hur avrinningskoefficienten ökar i takt med att nederbörden i området ökar. H+ är avverkningen med tunga skogsmaskiner (29,5 t respektive 24,5 t + last). H- är en avverkning med lättare skogsmaskiner (23,5 t respektive 21,5 t + last) (Behringer m. fl., 2025) CC-BY.	30
4.1	Bild över området och sträckan som undersökts. Kartdata: (OpenStreetMap, 2026), CC BY-SA 2.0.	32
5.1	Avrinningsområdena och dess utbredning ner mot västra stambanan och sjön Aspen (OpenStreetMap, 2026), CC BY-SA 2.0.	37

6.1	Grundscenario utan tryckbank där de blå streckade linjerna representerar scenario (a-d).	40
6.2	Grundscenario med tryckbank där de blå streckade linjerna representerar scenario (a-d).	40
A.1	Skjuvhållfasthet mot nivå samt trendlinje	I
A.2	Densitet mot nivå samt trendlinje	I
A.3	Konflytgräns mot nivå samt trendlinje	II
B.1	Jordlagerföljd för typmodellen med varierande lagerdjup genom modellen . . .	III
B.2	Parametervärde för bank ballast	III
B.3	Parametervärde för kombinerad analys av lera	IV
B.4	Parametervärde för odränerad analys av lera	IV
B.5	Parametervärde för sandig morän	IV
B.6	Parametervärde för odränerad analys av torrskorpan	V
B.7	Parametervärde för kombinerad analys av lera	V
B.8	Parametervärde för tryckbank	V
B.9	Parametervärde för grovkrossad sprängsten	VI
C.1	Kritisk glidyta för hela område utan tryckbank	VII
C.2	Kritisk glidyta för hela område med tryckbank	VII
C.3	Kritisk glidyta enbart bank med tryckbank	VIII
C.4	Kritisk glidyta enbart bank utan tryckbank	VIII
C.5	Grundscenario med normal sjö- och grundvattennivå (a)	VIII
C.6	Scenario med låg sjö- och grundvattennivå (b)	IX
C.7	Scenario med hög grundvattennivå (c)	IX
C.8	Scenario med översvämning mot bank (d)	IX

Tabeller

3.1	Dimensionerande varaktighet för olika förutsättningar. (Trafikverket, 2024).	9
3.2	Vattenhastighet vid olika förutsättningar. (Trafikverket, 2024).	10
3.3	Klimatfaktorer för olika varaktigheter och teknisk livslängd. (Trafikverket, 2024).	10
3.4	Lägsta totalsäkerhetsfaktor vid dimensionering med totalsäkerhetsmetoden. (Trafikverket, 2025a).	13
3.5	Lägsta godtagbara säkerhetsfaktor F_{EN} vid beräkning med stabilitetsprogram. (Trafikverket, 2025a).	14
3.6	Justeringsfaktor, r_ϕ som funktion av släntlutning. (Trafikverket, 2025a).	19
5.1	Intensitet i respektive avrinningsområde.	37
5.2	Reducerad area vid område A	38
5.3	Reducerad area vid område B	38
6.1	Normalflöde, maxflöde (efter avverkning) och procentuell ökning för respektive avrinningsområde.	39
6.2	Säkerhetsfaktor för bankområde utan torrskorpa. Presenteras med och utan tryckbank samt procentuell stabilitetsförändring mot grundscenario.	41
6.3	Säkerhetsfaktor för bankområde med torrskorpa. Presenteras med och utan tryckbank samt procentuell stabilitetsförändring mot grundscenario.	41
6.4	Säkerhetsfaktor för enbart bank utan torrskorpa. Presenteras med och utan tryckbank samt procentuell stabilitetsförändring mot grundscenario.	42
6.5	Säkerhetsfaktor för enbart bank med torrskorpa. Presenteras med och utan tryckbank samt procentuell stabilitetsförändring mot grundscenario.	42
6.6	Säkerhetsfaktor för bankområde. Presenteras med och utan tryckbank samt procentuell stabilitetsförändring mot grundscenario.	43
6.7	Säkerhetsfaktor för enbart bank med och utan tryckbank med procentuell stabilitetsförändring mot grundscenario.	43

1

Inledning

1.1 Bakgrund

Skogsavverkning och ökande nederbörd medför förändrade vattenflöden och ökar risken för höjda grundvattennivåer i skogsdominerade områden (Puntenney-Desmond m. fl., 2020) och (Lundin, 1979). Detta beror på att flödesvägarna förändras och att vegetation avlägsnas, vilket försämrar förmågan att hålla kvar och reglera vatten. Variationer av vattenflöden som uppstår på grund av avverkningen kan i sin tur orsaka problem med stabiliteten i närområdet och även osäkerhet kring den befintliga dimensioneringen (Li m. fl., 2026).

I ett förändrat klimat ökar belastningen på trummor, diken och andra avvattningsystem i takt med att flöden blir kraftigare (SMHI, 2024). Även underhållet och skötseln kan påverkas av de förändrade nederbördsmönstren, vilket medför en ökad osäkerhet kring systemets funktion. Att garantera systemens kapacitet och driftsäkerhet är en förutsättning för att både befintlig och framtida järnvägsinfrastruktur ska fungera korrekt.

En annan viktig aspekt är de ekonomiska konsekvenserna kopplat till ökade vattennivåer och flöden. I en rapport från MSB beräknas kostnaden som uppstår från ras, skred, erosion och översvämning uppgå till 20–50 miljarder kronor i Sverige fram till år 2100 (SGI & MSB, 2021). I takt med att extremvädret blir allt vanligare förväntas dessa kostnader stiga.

Sammanfattningsvis innebär detta att det finns ett behov av att utreda hur ovanstående faktorer tillsammans påverkar järnvägsinfrastrukturen, samt undersöka och föreslå vilka åtgärder som i teorin är mest effektiva för att hantera, lösa och förbättra dessa problem.

1.2 Syfte och frågeställning

Syftet med examensarbetet är att undersöka hur järnvägsbankens stabilitet påverkas av påfrestningar från vattenflöden och förändrade grundvattennivåer, kopplat till slutavverkning av skog och ett 100-årsregn med avseende på den ökade mängd nederbörd som förväntas i samband

med klimatförändringar. Genom litteraturstudie, flödesberäkning och simuleringar i SLOPE/W undersöks hur järnvägsbankens stabilitet förändras. Stabilitet i detta sammanhang avser järnvägsbankens hållfasthet mot brott, ras och bortspolning.

Frågeställningarna under arbetets gång har varit:

- Vilken påverkan har slutavverkning av skog på ytavrinning och grundvattennivå och innebär detta ett förändrat hydrologiskt mönster intill järnvägsanläggningen?
- Hur påverkas järnvägsbankens stabilitet av förändrade grundvattennivåer i marken och förändrade vattennivåer i intilliggande sjö?
- Vilka konsekvenser får extremväder till följd av klimatförändringen, och hur förväntas detta påverka erosion och bortspolning av järnvägsbanken?

1.3 Mål

Målet är att förstå den påverkan skogsavverkning och mer frekventa extremväder har på järnvägsbankar. Detta utifrån scenarier som kan försämra stabiliteten och därmed hotar säkerheten på järnvägsanläggningen.

1.4 Avgränsningar

Med hänsyn till examensarbetets omfattning, tid och resurser har följande avgränsningar gjorts för att säkerställa rapportens genomförbarhet:

- Arbetet begränsas till järnvägsbanken och nära intilliggande område.
- Ingen analys utförs för att undersöka vad som påverkar klimatförändringen och tillförlitlighet på den framtida klimatförändringen.
- Geoteknisk data och undersökning begränsas av tillgängligheten av de tekniska dokument och ritningar som funnits tillgängligt vid rapportens genomförande.
- Simuleringar av vattenflöden genom bank har ej genomförts.
- Ingen studie har genomförts av hur avrinningskoefficienten påverkas av lutningen i området.
- Kontrollberäkningar och vidare analyser av bankstabiliteten i annat program än GeoStudio SLOPE/W har ej genomförts.

2

Metod

Detta avsnitt presenterar den metodik och det tillvägagångssätt som har tillämpats för att utvärdera järnvägsbankens stabilitet under extrema väderförhållanden kopplade till närliggande avverkade skogsområden. För att utvärderingen och arbetet ska bli så realistiskt och noggrant som möjligt har två närliggande platser längs Västra stambanan vid Sjön Aspen, väster om Lerum studerats. Denna praktiska undersökning har sedan legat till grund för en västsvensk typmodell utformad för att representera förhållanden som är typiska för Västsverige, men även andra områden med mäktiga lerlager. Genom att utföra stabilitetsanalyserna på en typmodell kan antaganden och simuleringar utföras utan att negativa resultat påpekar problematik på faktiska platser.

2.1 Litteraturstudie

Arbetet utgår från en litteraturstudie som innefattar specifika delar kopplat till geoteknik och hydrologi. Ämnena har sedan studerats i detalj och undersökts med avseende på ett förändrat klimat och skogsavverkning intill järnvägsanläggningen i Sverige. Arbetet fortsatte sedan med att fördjupa förståelsen för järnvägsbankens uppbyggnad, funktioner och uppgift för att sedan koppla ihop ovanstående ämnen med de studerade teoretiska områdena. Vidare kompletterades sedan studien med möten och diskussioner med Trafikverket och geotekniker för att bygga upp en god förståelse av platsen som undersökts och vilka faktorer från omgivningen som har betydande påverkan på järnvägsbankens stabilitet.

2.1.1 Källmaterial

Innan arbetet påbörjades rekommenderade handledaren hos Trafikverket deras egen databas med samlade dokument och källor kring krav, praxis och rekommendationer kopplat till dimensionering och uppbyggnad av den svenska järnvägsinfrastrukturen. Detta källmaterial kompletterades med vetenskapliga artiklar från olika hemsidor, främst Scopus och Google Scholar. Även myndighetsrapporter och branschspecifika artiklar kopplat till andra delar av arbetet.

Nyckelorden för de olika ämnesområden vi studerat var:

- "railway" AND "embankment" AND "erosion" AND "climate change"
- "timber harvesting" AND "soil compaction" AND "surface runoff"
- "embankment stability" AND "water flow" AND "extreme weather"

Utöver nyckelorden användes sökord i olika kombinationer för att hitta svenska källor med fokus kring teorin vi arbetat med. Källorna valdes efter vad som var relevant, användbart och informativt för arbetets genomförande.

Materialet som användes för att utvärdera egenskaper och parametrar på den valda platsen togs fram av Trafikverket med hjälp från Partille kommun. Även data från branschorganisationer och andra myndigheter kompletterade informationen till platsen och egenskaperna som ligger till grund för resultatet.

2.2 Fallstudie

I arbetet analyserades en delsträcka av Västra stambanan (km 440–444) för att få en bättre förståelse för de förhållanden som råder vid geotekniskt kritiska platser. I området har av Trafikverket identifierat en riskpunkt, vilket är en av anledningarna till att området studerats. Genom att analysera denna plats skapades en djupare förståelse för de påfrestningar som uppstår på liknande sektioner nationellt. Fallstudien ligger därför till grund för en typmodell, som ska representera en generell plats med riskfaktorer kopplade till geologi, hydrologi och topografi i Västsverige. Valet av plats grundar sig i dess specifika geometri, där järnvägsbanken är belägen på en smal landremsa mellan öppet vatten och en brant slänt. Denna placering ökar sårbarheten för vattenflöden, ras och skred. Det var därför nödvändigt att analysera området mer i detalj för att ta reda på hur olycksrisken påverkas av hydrologin, geologin, extremväder och skogsavverkning.



Figur 2.1: Bild över området och sträckan som undersökts. Kartdata (OpenStreetMap, 2026), CC BY-SA 2.0.

2.3 Programvaror och verktyg

För att arbetet skulle påvisa trovärdiga resultat har programvaror och verktyg etablerade i branschen använts. Valet av verktyg har gjorts för att kunna bearbeta geoteknisk data samt simulera olika geotekniska scenarier kopplat till arbetets frågeställningar.

2.3.1 GeoStudio SLOPE/W

Den geotekniska stabilitetsanalysen har gjorts i GeoStudio, SLOPE/W (Seequent, 2026). Programvaran valdes i samråd med examinator efter erfarenhetsnivå samt eftersom programmet är ett etablerat analysprogram i branschen. Verktyget har använts för att simulera olika vattennivåförändringar och för att utvärdera hur dessa påverkar järnvägsbankens stabilitet.

Programvaran SLOPE/W i GeoStudio är ett kraftfullt verktyg för att utföra stabilitetsanalyser men innehåller begränsningar och osäkerheter jämfört med de faktiska förhållandena som uppstår i verkligheten. SEEQUENT (2022) beskriver i sin *Stability Modeling with GeoStudio* hur programmet kan avvika sig från verkligheten. En av de mest fundamentala osäkerheterna ligger i gränsvärdes metoden (Limit Equilibrium) som enbart baseras på statik. Detta innebär att programmet inte beräknar eller tar hänsyn till töjningar eller förskjutningar i marken. Det bör noteras att beräkningarna har utförts med Morganstern-Price metoden. Även om metoden uppfyller full jämvikt tar den inte hänsyn till deformationer i bankkroppen

2.3.2 QGIS och Geodata

För att enklare kunna bearbeta geografisk information har verktyget QGIS använts (QGIS Foundation, 2026). Detta verktyg har använts för att bearbeta topografisk data hämtat från SLU:s karttjänst Geodata Extraction Tool (GET). Utöver denna data har även information från SGU:s jordartskarta och brunnsarkiv legat till grund för parametrar kopplat till geologin och hydrologin i området.

Genom att kombinera höjdmodeller och geoteknisk data från borrhålsritningar har tvådimensionella tvärsektioner tagits fram för att analyseras och sedan simuleras i SLOPE/W.

2.4 Hydrologisk analys genom tillämpning av rationella metoden

Som komplement till den geotekniska simuleringen har en hydrologisk analys av de valda studieområdet gjorts, för att se flödesökningen som uppstår vid skogsavverkning. Analysen har gjorts med rationella metoden och beskrivs mer ingående i kapitel 3.1.2.1.

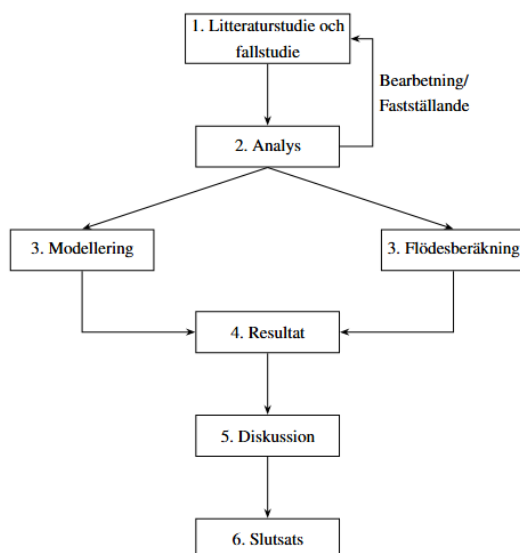
Metoden har använts för att beräkna det dimensionerande flödet baserat på regnets intensitet och avrinningsområdets förändrade markförhållande. Genom att analysera det förändrade vattenflödet är det möjligt att granska den inverkan som teoretiskt skulle kunna få konsekvenser för järnvägsstabiliteten. I examensarbetet väljs en varaktighet av regnet på 60 minuter vid beräkning med rationella metoden. Denna varaktighet väljs för att efterlikna den studie som gjorts i Österrike där även avrinningskoefficienten är hämtad från. Att välja en varaktighet på 60 minuter är även en branschstandard som förekommer i flera officiella myndighetspublikationer.

2.5 Användning av AI

I arbetet har AI-verktyg använts för att effektivisera delar av arbetsgången. AI har främst använts till källsökningshjälp, bildgenerering, instruktioner till programvaror, sökord till hemsidor, hjälp med kodning till Latex samt översättning av texter. AI-verktygen som använts under arbetets gång är Google Gemini, Google NotebookLM och ChatGPT.

2.6 Förenklad beskrivning av arbetsgång

Nedan följer en överblick av hur arbetsgången genomförts samt hur arbetet delats upp i två block; modellering och flödesberäkning för att sedan utvärderas tillsammans.



3

Teori

Detta kapitel presenterar den teori och litteratur som använts för att analysera och utvärdera de konsekvenserna ett ökat nederbördsmonster och avverkning har på den svenska järnvägsinfrastrukturen. Teorin som presenteras ligger till grund för analysen av resultatet och den förståelse som behövts för arbetets genomförande.

3.1 Järnväg

Sveriges järnvägs historia började år 1796 i Höganäs då gruvingenjören Thomas Stawford tog med sig det som benämnts vagnväg från England (Järnvägs museet, 2024). Vagnvägarna bestod av träspår lagda på en upprustad vägbank med vagnar som drogs av hästar. Den huvudsakliga uppgiften med dessa vagnar var att transportera gods från gruvorna till hamnarna. Den första riktiga järnvägen utifrån definitionen ”*Järnväg för allmän trafik och lokdragna tåg*” invigdes år 1856. Etableringstakten av stambanor var stor och år 1874 låg Sverige i topp i Europa gällande kilometer järnväg (Populär Historia, 2006).

På senare tid har järnvägen efter en period i skugga blivit mer aktuell igen. Allt fler väljer att åka tåg och 2019 nåddes en stor milstolpe efter fler än 250 miljoner resor genomförts (Trafikverket, 2025b). Idag har inte tekniken och banorna utvecklats i samma takt som resandet ökat. Vilket har lett till en historisk satsning för att bygga ut, rusta upp och modernisera järnvägen. För framtiden planeras stora infrastrukturinvesteringar för att utveckla järnvägarna i Sverige. Järnvägen skall bli mer pålitlig genom att fler delar byts ut i stället för att reparera gamla, samtidigt som man introducerar modern teknologi. Framtidsvisionerna för järnvägen består av allt från magnetåg, hyperloop och mer konventionella tåg med högre hastigheter.

3.1.1 Bankens utformning, struktur och uppbyggnad

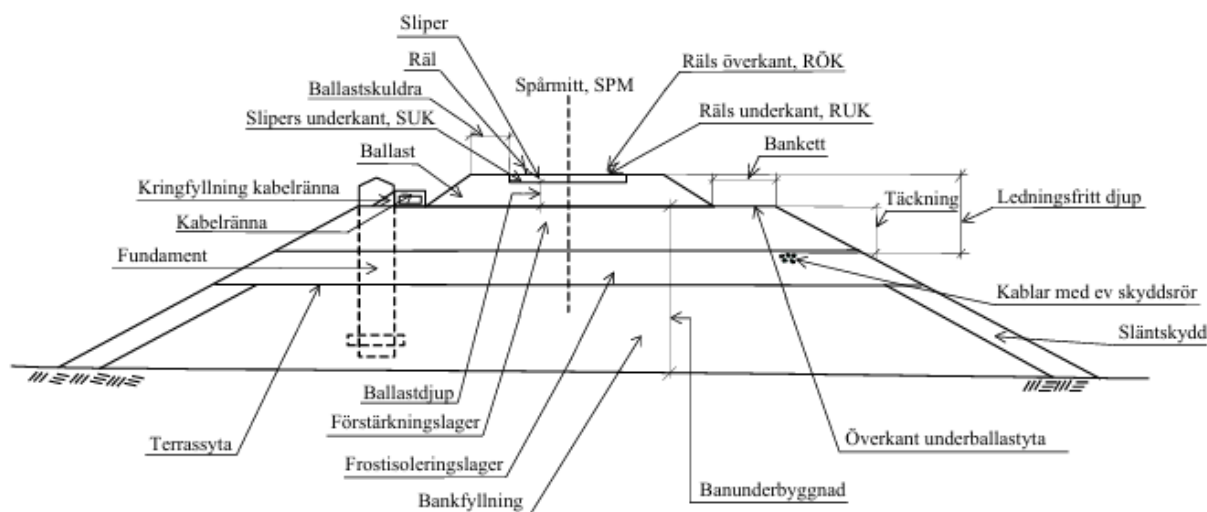
Historien om järnvägsbankens utformning började i slutet av 1800-talet då geotekniska vetenskapen inte hade introducerats i samhället (Dehlbom m. fl., 2021). Avsaknaden av denna vetenskap resulterade i att flera skred uppstod och vidare låg till grund för att SJ:s geotekniska

kommission tillsattes år 1914 för att råda bot mot skreden och utveckla metoder för stabilare banbankar. Tekniken för banbanksbygge för de första järnvägsbankarna i Sverige var väldigt enkel och utfördes primärt med spade, hacka och skottkärror. I lämpligast fall bestod bankarna av sand, grus och morän men i vissa fall förekom även bankar bestående av silt och fast lera. Även packningen av materialet var ytterst begränsad, i bästa fall packades materialet för hand men det tillhörde inte ovanligheterna att packningen uteblev.

Enligt Trafikverket (2015a) består järnväg på bank geotekniskt sett huvudsakligen av en bankropp som är indelad i banöverbyggnad och banunderbyggnad. Dessa två konstruktionsdelar vilar i sin tur på undergrunden som även kan ses som den naturliga marken. Bankroppen (också kallat järnvägsbanken) är den stödkonstruktion som rälsen vilar på för att ge tågen en säker passage över den naturliga marken. För att bankroppen ska kunna säkerställa tågtrafikens stabila framfart behöver bankroppen vara dränerad, bärkraftig och frostsäker.

Banöverbyggnaden beskrivs som den del belägen mellan räl överkant och underballastens överyta och består (uppifrån och ner) av spåröverbyggnad och ballastlager (Trafikverket, 2015a).

Banunderbyggnaden består enligt dagens regler av ett underballastlager för förstärkning och vid behov av ett underballastlager för frostisolering (Trafikverket, 2015a). Underballasten ligger på en bankfyllning där banan går på bank. Undergrunden under banken kan vara förstärkt eller oförstärkt.



Figur 3.1: Tvärsektion med järnvägstekniska benämningar – bank (Trafikverket, 2015a).

3.1.2 Avvattningssystem

Avvattningssystemen i järnvägens anläggning har flera olika uppgifter. Dels att säkerställa att konstruktionen kan ta emot den vattenlast som kan tänkas uppstå under konstruktionens livslängd, dels att säkerställa bärigheten och skydda anläggningen mot oönskade effekter som kan tänkas uppstå ur ett hydrologiskt perspektiv (Trafikverket, 2017). Järnvägsbanken är därför utformad så att vatten leds bort i krossmaterialet och vidare ner genom tvärfall till anslutande diken vid sidan av banken (Trafikverket, 2025a).

Utöver den direkta avledningen från spårkonstruktionen har avvattningssystemet en annan viktig uppgift. Detta är att säkerställa att vattnet transporteras, förflyttas och bortleds genom uppsamling och en kontrollerad förflyttning inom banområdet (Trafikverket, 2024). Detta sker genom flera sammanhängande komponenter såsom diken, trummor eller andra ledningssystem som avlägsnar vattnet på ett bra och effektivt sätt vid rätt och dimensionering.

3.1.2.1 Dimensionering med rationella metoden

Avvattningssystemet dimensioneras med den rationella metoden för mindre avrinningsområden, detta för att säkerställa att flödena som uppstår vid anläggningen inte ska leda till skador eller oönskade effekter. Dimensioneringen baseras på regnets varaktighet och intensiteten enligt ekvation 3.1.

$$Q = K_f \cdot i \cdot A_{\text{hårdgjord}} \cdot \varphi + (K_f \cdot i - f_i) \cdot A_{\text{infiltrerbar}} \quad (3.1)$$

Normalt används koncentrationstiden för att bestämma det högsta flödet som uppstår i systemet. I detta examensarbete används en bestämd varaktighet på regnet för att tydligare se effekterna av skogsavverkningen.

Tabell 3.1: Dimensionerande varaktighet för olika förutsättningar. (Trafikverket, 2024).

Förutsättningar	Varaktighet
Flacka områden med rinntider ≤ 15 minuter	15 minuter
Områden med lutningar $> 4\%$	10 minuter
Trågsträckor och skärningssträckor med lågpunkt	10 minuter
Längre och/eller sammansatta avvattningssystem med rinntider > 15 minuter	Som förväntad rinntid

Vid tillräckligt med data från geometrin i området bestäms hastigheten som kan uppstå i det dimensionerande vattensystemet på den tänkta platsen (Trafikverket, 2024). Hastigheten används för att bestämma områdets totala koncentrationstid. Koncentrationstiden bestämmer sedan vilket som blir den dimensionerande regnvaraktigheten i området till det valda avvattningssystemet.

Tabell 3.2: Vattenhastighet vid olika förutsättningar. (Trafikverket, 2024).

Förutsättningar	Vattenhastighet (m/s)
Ledningar i allmänhet	1,5 m/s
Tunnel och större ledningar	1,0 m/s
Dike (ofta vattenförande), rännsten och trumma	0,5 m/s
Grunda diken (sällan vattenförande)	0,2 m/s
Markyta	0,1 m/s

Efter varaktigheten och återkomsttiden bestämts, bestäms intensiteten på regnet. Detta genom följande ekvation:

$$i = 190 \cdot \sqrt[3]{T} \cdot \frac{\ln(t_r)}{t_r^{0,98}} + 2 \quad (3.2)$$

Den beräknade intensiteten ska justeras med hänsyn till klimatförändringar. Klimatfaktorerna som används vid dimensionering beskrivs och förklaras mer i kapitel 3.4

Tabell 3.3: Klimatfaktorer för olika varaktigheter och teknisk livslängd. (Trafikverket, 2024).

Varaktighet	Klimatfaktor
Mindre än 60 minuter	1,3
1 - 24 timmar	1,2
0 - 24 timmar (vid 120 års teknisk livslängd)	1,4

Efter att intensiteten och varaktigheten är bestämd beräknas flödet (Trafikverket, 2024). Det dimensionerande flödet ska ta hänsyn till icke hårdgjorda ytor i området som har en infiltrations- och magasineringskapacitet. Det dimensionerade flödet beräknas sedan med rationella metoden.

Efter det dimensionerande flödet är bestämt kan avvattningssystemet som behövs på platsen bestämmas. Utöver flödet behöver hänsyn tas till platsens geotekniska förhållanden och topografi. I Sverige går en stor andel av järnvägsnätet genom skogslandskap och där blir faktorer som markens naturliga infiltrationsförmåga och materialtransport i vattendragen avgörande. Genom att kombinera den rationella metoden med landskapet på platsen kan diken, dräneringsfunktioner och trummor dimensioneras för att säkerställa att konstruktionen säkert klarar av både dagens och framtidens klimat samt extrema väderförhållanden.

3.1.2.2 Diken

Diken blir det naturliga förstahandsvalet vid hanteringen av dagvatten och även som dränering för överbyggnaden av järnvägsstrukturen (Trafikverket, 2024). Detta sker primärt genom öppna diken som har en magasinering och infiltrerande funktion. Dikets uppgift är både att ta hand om vattnet från järnvägsbanken och föroreningarna som bildats där, men också se till att vattnet från järnvägen inte rinner ut till omgivande mark på ett okontrollerat och osäkert sätt.

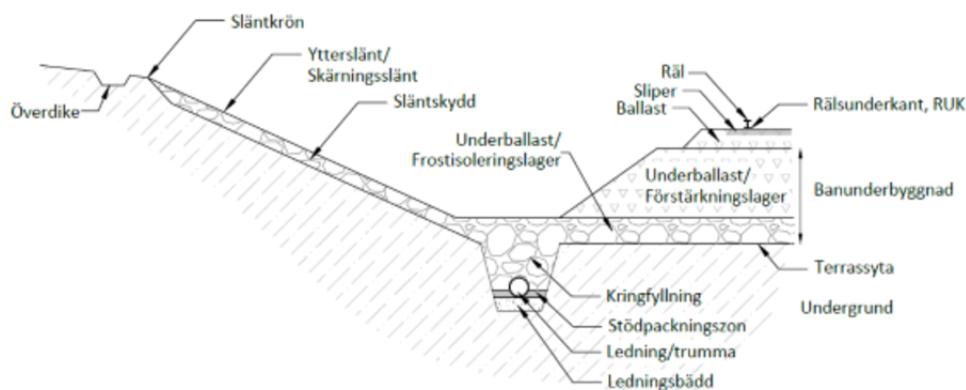
Det ställs därför krav på vilken typ av dike man anlägger och hur dessa sedan utformas. Kravet säger att man bör utforma diken så den minsta längslutningen är 5 ‰ om detta är möjligt med rimliga åtgärder. Vid flack terräng kan detta dock behöva justeras ner till 2 ‰ men aldrig lägre än så. Detta för att säkerställa att vattnet som kommer till diket ska kunna rinna obehindrat med självfall och för att minska underhållet som annars kan uppstå till följd av för flacka diken.

3.1.2.3 Dräneringsledning

Dräneringsledningen används i järnvägsstrukturen för att transportera bort vatten på ett effektivt och säkert sätt (Trafikverket, 2024). Dessa anläggs då öppna diken med ett tillräckligt djup inte är möjligt att anlägga eller av andra skäl som gör dräneringsledningar mer fördelaktiga. Dräneringsledningarna ska ha en god hydraulisk kontakt med överbyggnaden av konstruktionen och ha en enkel tillrinning för att kunna leda bort vattnet på ett bra sätt. Det innebär att dräneringsledningarna ofta anläggs i ett dränerande material med omgivande geotextil för att säkerställa att endast vatten rinner in i rören och för att hålla ute jordpartiklar och annat sediment. Dessa dimensioneras med självfall och ska gå att rengöras enkelt och effektivt.

3.1.2.4 Trummor

Trummans uppgift är att leda vattnet under konstruktionen för att förhindra att översvämningar eller andra problem uppstår (Banverket, 2003). Trumman ska vid ett normalt vattentillstånd avvattna uppströms liggande markområde på ett effektivt sätt. Detta genom rätt egenskaper i form av höjdläge och lutning av trumman (Trafikverket, 2024). Hänsyn ska även tas till de risker som kan uppstå vid igensättning av trummorna. För att förebygga detta anpassar man dimensioner, rakhet, materialval och lutning till de aktuella förutsättningarna på platsen. Utformning och val av dimension av trumma bör också anpassas till scenarier som kan uppstå i form av extremhändelser. Det är även viktigt att se till att trummans in- och utlopp skyddas genom åtgärder av olika erosionsskydd. Det kan vara skydd i form av förankring, uppbyggnad av stenpartier, val av geometri och uppbyggnad för in- respektive utlopp.



Figur 3.2: Benämningar av järnvägskonstruktionens olika delar i skärning. (Trafikverket, 2024).

3.1.3 Krav på säkerhet och stabilitet

Enligt Trafikverkets regelverk Trafikverket (2025a) och Trafikverket (2024) beskrivs järnvägsbankens säkerhet utifrån krav på en stabil och varaktig underbyggnad som klarar av tågets laster utan att deformeras i sådan omfattning att det innebär en risk. Kärnan i järnvägsbankens säkerhet vilar på den geotekniska stabiliteten som säkerställs genom konstruktion med hjälp av säkerhetsmarginaler för att motstå ras, skred och vibrationer från tågtrafiken. Samtidigt ska järnvägsbanken säkerhet och stabilitet upprätthållas under en längre tid genom att motstå påfrestningar som försämrar bankens bärrighet.

3.1.3.1 Tryckbank som stabiliserande åtgärd

En vanligt förekommande förstärkningsåtgärd för järnvägsbankar placerade på svag jord är att anlägga tryckbankar (Ögren, 2021). En tryckbank avser att fungera som en markförstärkning och stabiliserar intilliggande spårområde. Tryckbank definieras som en fyllnadsmassa avsedd att med sin egen mothållande tyngd öka stabiliteten i marken och motverka skred. Vid eventuella behov av förstärkningsåtgärder med tryckbank görs utredningar för att bestämma på vilka delsektioner av sträckan en tryckbank framstår som lämplig åtgärd.

3.1.3.2 Materialegenskapernas påverkan på järnvägsbankens stabilitet

Materialegenskaperna hos såväl bankfyllningen som den underliggande jorden är av avgörande betydelse för järnvägsbankens bärförmåga, stabilitet och beständighet.

3.1.3.3 Säkerhetsfaktor

Säkerhetsfaktorn F definieras som förhållandet mellan tillgänglig medelskjuvhållfasthet och den utvecklade medelskjuvspänning längs glidytan (Sällfors Göran, 2023).

$$F = \frac{\tau}{\tau_{mob}} \quad (3.3)$$

Desto större F är desto större är säkerheten mot att brott uppstår (Trafikverket, 2025a). Brott förväntas i teorin uppstå enligt totalsäkerhetsmetoden när $F < 1$ och vid $F = 1$ befinner sig konstruktionen i brottsgränstillstånd. Vid dimensionering av säkerhetsfaktorn enligt totalsäkerhetsmetoden utgår man från följande tabell.

Tabell 3.4: Lägsta totalsäkerhetsfaktor vid dimensionering med totalsäkerhetsmetoden. (Trafikverket, 2025a).

Säkerhetsklass	Odränerad analys	Dränerad och kombinerad analys
1	1,35	1,20
2	1,50	1,30
3	1,65	1,40

3.1.3.4 Skjuvhållfasthet

Utifrån Larsson m. fl. (2007) beskrivs skjuvhållfasthet (τ) som ett materials inre motstånd mot deformation och glidning längs en brottyta. En kritisk egenskap som avgör om jordmassan eller konstruktionen förblir stabil under belastning eller passerar brottsgränstillståndet.

Odränerad skjuvhållfasthet: Den odränerade skjuvhållfastheten beskrivs som den hållfasthet som är dimensionerande för stabilitetsberäkningar i finkornig jord (kohesionsjord) under förhållanden där ingen dränering av portrycket sker. Odränerade skjuvhållfasthet är beroende av vilken typ av jord, belastningsfall, förkonsolideringstryck och överkonsolideringsgrad.

Dränerad skjuvhållfasthet: Den dränerade skjuvhållfastheten i finkornig jord beskrivs utifrån de effektiva hållfasthetsparametrarna c' och ϕ' . För grövre friktionsjord används normalt enbart friktionsvinkeln ϕ' som varierar med lagringstäthet och spänningsnivå.

3.1.3.5 Partialkoefficientmetoden

Dimensioneringskraven i TRVINFRA-00230 sker huvudsakligen genom stabilitetsprogram utvecklade för totalsäkerhetsanalyser med hjälp av partialkoefficientmetoden enligt *eurokoderna SS-EN 1990 - SS-EN 1999* (Trafikverket, 2025a). Partialkoefficientmetoden går ut på att dela upp ”partial” säkerheten på olika delar i beräkningen i stället för att sätta en säkerhetsmarginal i slutet på en dimensioneringsberäkning. Dimensioneringssättet för geokonstruktioner som innehåller slänter och banker kategoriseras enligt dimensioneringssätt DA3, och enligt detta dimensioneringssätt beskrivs hur partialkoefficienterna skall fördelas mellan laster, markens hållfasthetsparametrar och markens bärförmåga. Vid tillämpning ska karakteristiskt värde för materialegenskaper definieras för varje enskilt dimensioneringsfall. Vid användning av partialkoefficientmetoden genom stabilitetsprogram ska partialkoefficienten för säkerhetsklass 2 bestämma dimensionerande värde för laster och materialegenskaper. Säkerhetsklassen används även för dimensionering av laster och materialegenskaper för säkerhetsklass 1 och 3.

Tabell 3.5: Lägsta godtagbara säkerhetsfaktor F_{EN} vid beräkning med stabilitetsprogram. (Trafikverket, 2025a).

Säkerhetsklass	F_{EN}
1	0,90
2	1,00
3	1,10

För materialegenskaperna i geokonstruktioner där ett lågt värde för materialegenskap är dimensionerande uttrycks det dimensionerande värdet X_{dim} som

$$X_{dim} = \frac{X_k}{X_M} \quad (3.4)$$

Om ett högt värde för materialegenskap är dimensionerande uttrycks istället X_{dim} som

$$X_{dim} = X_k \cdot \gamma_M \quad (3.5)$$

Där X_k är det karakteristiska värdet för materialegenskapen för ett givet dimensionsfall. γ_M är partialkoefficient för materialegenskap och sätts till 1,5 för odränerad skjuvhållfasthet (τ_u) och 1,3 för dränerad skjuvhållfasthet (c' och $\tan \phi'$).

3.1.3.6 Totalsäkerhetsmetoden

Totalsäkerhetsmetoden alt. totalsäkerhetsfilosofi används i liknande fall för stabilitetsberäkningar som partialkoefficientmetoden gör. Det som skiljer dessa från varandra är i huvudsak att totalsäkerhetsmetoden använder sig av en enskild säkerhetsmarginal i slutet på beräkningen jämfört med partialkoefficienten som tillsätter säkerhetsmarginaler på flera datapunkter (IEG, 2010). I det praktiska arbetet föredras att använda sig av totalsäkerhetsmetoden för stabilitetsberäkningar på befintliga banker och inte på nya konstruktioner där partialkoefficientmetoden föredras (SGI, 2023).

I fall där dimensionering med totalsäkerhetsmetoden utförs ska totalsäkerhetsfaktorn mot stabilitetsbrott för den mest sannolika glidyten i jord minst uppgå till värden enligt tabell 3.4 (Trafikverket, 2015b). För befintliga järnvägsbankar görs tillståndsbedömning enligt *TDOK 2015:0154*.

3.1.4 Bankens egenskaper

Järnvägsbanken agerar fundament och skapar en stabil grund för passerande tåg (Trafikverket, 2015a). När tåg färdas längs banken uppstår stora krafter som behöver tas hand om för att för-

hindra eventuella rörelser i mark som kan orsaka instabilitet eller olyckor för tåg (Dehlbom m. fl., 2021). Bankens huvudsakliga uppgift är därmed att fördela lasterna ner i marken och skapa en stabil passage för tåg. Vidare fyller banken en geometrisk funktion där banken utjämnar naturliga nivåskillnader i landskapet och lutningar för räls så tågen smidigare kan passera kurvor i högre hastigheter (Trafikverket, 2015a).

3.1.5 Vattnets inverkan på järnvägsbanken

Erfarenhetsmässigt utgör vattenrelaterad problematik en av de främsta orsakerna till skador på järnvägsbanken (Dehlbom m. fl., 2021). Merparten av alla allvarliga incidenter kan härledas till ökad nederbörd, intensiva skyfall, kraftiga vattenflöden och förhöjda grundvattennivåer. I detta sammanhang är uppkomsten av erosion ofta sammankopplat till brister i järnvägsbankens avvattningssystem. När systemet inte kan hantera vattenmängderna uppstår okontrollerade flöden som påverkar järnvägens stabilitet. Detta kan uppstå genom äldre trummor och trummor med nedsatt kapacitet, men även av igenvuxna diken och täta dräneringar. Bristen hos trummorna kan bero på eftersatt underhåll, extrema väderhändelser samt förändrade flödesvägar. Den bakomliggande hydrologiska processen och hur erosion påverkar infrastrukturen fördjupas i de två efterföljande kapitlen.

3.2 Hydrologi

Hydrologi beskriver läran om jordens vatten, dess förekomst, cirkulation och fördelning, samt fysikaliska och kemiska egenskaper (Sveriges Skogsvårdsförbund, 2000). Huvuddelen inom ämnet är det hydrologiska kretsloppet. Där kopplingen mellan atmosfären, markytan, vattendrag, hav, sjöar och de underjordiska magasinen styr tillgången på vatten i landskapet.

I denna rapport kommer tekniska sammanhang som fokuserar på hydrologin och vattnets dynamik kopplat till specifika avrinningsområden i anslutning till järnvägen främst handla om:

Markvatten: Vattnet i den omättade zonen ovanför grundvattenytan (SMHI, u. å-c). Här är hålrummen i jordlagren fyllda med både luft och vatten tillskillnad från grundvattenzonen där hålrummen är helt vattenfyllda.

Grundvatten: Det vatten som finns i jordlager eller berggrund där samtliga porer, sprickor och hålrum är helt vattenfyllda (SMHI, u. å-b). Eftersom grundvattnet har filtrerats genom flera lager är detta vatten mestadels mycket rent och används som dricksvatten.

Ytvatten: Vatten som finns uppe på jordens yta (Sverges geologiska undersökning, 2025). Ytvattnet beskrivs som det vattnet som finns eller rör sig på markytan till skillnad från mark-, eller grundvatten som återfinns i jordlagren.

Dagvatten: Dagvatten är det vatten som kommer i form av nederbörd genom smältvatten eller regn och som inte tränger ner på ytan utan avrinner på markytan (Naturvårdsverket, 2026).

I Sverige är det primärt Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (SMHI) som ansvarar och arbetar med frågor kopplat till väder, vatten, klimat och delger information till andra myndigheter, näringsliv och allmänheten relaterat till detta. Medan Sveriges geologiska undersökning (SGU) är myndigheten som arbetar med frågor kopplat till berg, jord och grundvatten. Eftersom denna rapport även har ett fokus på skogsbruk, markanvändning och vattnet kopplat till järnvägskonstruktioner är även Skogsstyrelsen (SKS) och Sveriges lantbruksuniversitet (SLU) viktiga källor kopplat till hydrologin och avrinning.

Genom att förstå kunskapen om hur vattnet och hydrologin påverkar samhället och dess funktioner, blir det avgörande för att förstå hur effekterna som uppstår till följd av detta påverkar oss och de konstruktioner vi bygger och förvaltar i Sverige, inte minst ur ett järnvägsinfrastrukturperspektiv (SMHI & Bergström Sten, 2014).

3.2.1 Teorin bakom vattenflöden på och i marken

När nederbörd eller smältvatten når markytan bildas antingen ytavrinning eller så infiltreras vattnet ner i marken (SMHI & Bergström Sten, 2014).

Direkt ytavrinning: Uppstår när intensiteten av nederbörden är väldigt hög eller när markens genomsläpplighet av vatten är mycket liten. Detta uppstår vanligtvis i täta lerjordar, vid berg i dagen eller vid hårdgjorda ytor.

Infiltration: Sker vid markförhållanden där marken har en hög genomsläpplighet. I Sverige består jorden till stor del av moränlager där vattnet till största del infiltreras ner i marken i stället för att rinna på marken i form av ytavrinning.

Innan vattnet som faller på markytan infiltreras ner till grundvattnet passerar det genom den omättade zonen (SMHI & Bergström Sten, 2014). Denna zon återfinns i de översta jordlagren och kallas även för markvattenzonen. I denna zon återfinns ett viktigt begrepp kopplat till vattnets förekomst i jordlagret, nämligen fältkapaciteten. Fältkapaciteten är den mängden vatten lagret kan hålla innan vattnet infiltreras ner till grundvattennivån. Under sommarperioden uppstår ofta ett underskott på vatten i denna zon. Det så kallade markfuktighetsunderskottet. Det sker eftersom att denna period är torrare, har högre evaporation och för att vegetationen i en högre grad suger upp vatten under denna period (SMHI, u. å-a). Det som händer är att det översta lagret blir uttorkat och fungerar som en buffert för häftiga och ihållande regn som ofta sker under denna period (SMHI & Bergström Sten, 2014). Det är en viktig funktion som bidrar till att vattnet på ett effektivt sätt försvinner från markytan och infiltreras ner i jordprofilen, vilket på så vis minskar risken för ytavrinning och översvämningar. En varm sommar

kan markfuktighetsunderskottet på vissa platser i Sverige motsvara en tredjedel av den totala årsnederbörden.

Under den omättade zonen finns den mättade zonen (SMHI & Bergström Sten, 2014). I denna zon är alla hålrum och porer helt fyllda med vatten. När vattnet infiltrerats ner till denna zon återfinns det som grundvattnet. För att mäta hur fort vattnet transporteras ner genom detta lager bestäms vattnets konduktivitet (K-värde). Konduktivitet blir då ett mått på hur stor vattenmängd, som per tidsenhet passerar en ytenhet under tryckgradienten. Förenklat innebär det hur enkelt eller svårt det är för vattnet att rinna genom marken. Ju högre konduktivitet marken har, desto snabbare sjunker vattnet undan.

3.2.2 Vattnets påverkan på konstruktioner

Vid byggnation av konstruktioner i infrastrukturprojekt blir vattnets påverkan en betydande del av planering, genomförande och uppföljning. Detta eftersom vattnet är en av de mest kritiska delarna under konstruktionens livslängd och en mycket viktig aspekt att ta hänsyn till (Granhage Leif, 2009). Vattnets påverkan sker genom flera delar. Dessa delar delas in i mekaniska egenskaper, fysisk skada genom erosion och bortspolning eller egenskaper som försämrar konstruktionens långsiktiga stabilitet (Trafikverket, 2024).

En av de största utmaningarna för framtidens infrastruktur med avseende på vatten är stigande havsnivåer och en förhöjd grundvattennivå (Trafikverket, 2018). En höjning av medelhavsnivån på upp emot en meter i södra Sverige riskerar att få konsekvenser på den befintliga järnvägsinfrastrukturen i form av översvämning, inte minst vid kraftigt oväder. Utöver översvämningen påverkar en förhöjd grundvattennivå också konstruktionerna avsevärt. När grundvattennivåerna stiger minskar den omättade zonen drastiskt. Detta leder till ett ökat portryck i de övre jordlagren. Vilket för med sig att effektivspänningen minskar genom följande samband (Sällfors Göran, 2023):

$$\sigma_0 = \sigma'_0 + u \quad (3.6)$$

Detta för med sig att den långsiktiga stabiliteten för konstruktioner äventyras och att förutsättningarna på platsen förändras.

Klimatförändringar leder också till förändrade nederbördsmonster (Lee & Romero, 2023). Detta påverkar konstruktioner genom kraftiga skyfall och flöden som spolas direkt mot järnvägsanläggningen (Trafikverket, 2018). Vidare sätter flödet stor press på konstruktionernas avvattningsystem som vid underdimensionering eller igensättning kan leda till erosion, översvämning och bortspolning av viktiga delar av konstruktionen. Detta får konsekvenser i form av mycket stora störningar i trafiken och avsevärda reparationskostnader.

3.3 Erosionsprocesser

Erosion är en hydrologisk process som sker då jord, berg eller annat material nöts ner och förs bort av en yttre kraft (Statens Geotekniska Institut, 2025).

Erosionsprocessen som sker intill järnvägsanläggningarna är väldigt komplex och ställer därför stora krav på en korrekt riskbedömning. Konsekvenserna av erosion i spårområdet kan hota anläggningens stadga, beständighet och bärighet (Trafikverket, 2024). Erosionsprocessen som sker vid anläggningen sker på flera olika sätt. Främst genom yterrosion men även inre erosion kan förekomma. Det kan även ske erosion genom överrinning, vatten samlas då och flödar över banvallen på ett sätt som gör att det blir kraftig erosion i innerslätten och bortspolning av kritiska delar av konstruktionen. Dessa processer kan få allvarliga konsekvenser i form av trafikstopp eller urspårningsrisk om det inte åtgärdas i tid.

3.3.1 Faktorer som påverkar erosionsprocesser

Erosion påverkas av flera faktorer intill järnvägsanläggningen. Stark lutning och brant terräng är viktiga faktorer att beakta, detta eftersom vattenflödena blir kraftigare och en större risk för materialtransport i det rinnande vattnet uppstår (Thorén m. fl., 2020). Materialtransporten i sin tur kan sätta igen viktiga delar av avvattningsystemet och därför påskynda och förvärra konsekvenserna av vattenflödena (Trafikverket, 2024). Höga bankar eller bank på skrå blir också kritiska platser för erosionsprocessen. Detta eftersom skillnaden på vattentrycket på vardera sida av banken kan bli väldigt stora. Det gör i sin tur att risken för erosion och skred ökar markant. En annan viktig aspekt rapporten tar med i simuleringen ur stabilitetssynpunkt är järnvägsbankar som ligger tätt intill ett vattendrag. Här kan en sänkning av vattennivån få stora konsekvenser i form av skredrisk och då även stabilitet av konstruktionen. Detta eftersom man tar bort den mothållande kraften som fanns där innan sänkningen skedde.

3.3.2 Säkerhetsklass för erosionsskydd

För geoteknisk stabilitet dimensioneras järnvägsbankar enligt Trafikverket (2025a) som geokonstruktioner som inte kan repareras eller bytas ut utan att påverka järnvägstrafiken för en livslängd på 120 år. Järnvägsbank i ban-typ 1 och 2 ska hänföras till säkerhetsklass 3 som består av krav ställda högre än säkerhetsklass 1 och 2. För konstruktioner i säkerhetsklass 3 gäller att stenstorleken, D_{50} [m] följer nedanstående ekvation.

$$D_{50} = 0,02 \cdot (1,65 \cdot V_{dim}/r_{\phi})^2 \quad (3.7)$$

Där stenstorleken D_{50} utgör 50 % av kornfördelningen hos materialet. V_{dim} är dimensionerande medelvattenhastighet vid flöden med 100 års återkomsttid i vattendrag [m/s]. r_{ϕ} är en justeringsfaktor enligt tabell 3.6 för erosionsskydd av jord- och krossmaterial som funktion av friktionsvinkeln hos erosionsskyddet och släntlutningen.

Tabell 3.6: Justeringsfaktor, r_{ϕ} som funktion av släntlutning. (Trafikverket, 2025a).

Släntlutning	$\phi' = 35^\circ$	$\phi' = 40^\circ$	$\phi' = 45^\circ$
Plan botten	1,0	1,0	1,0
1:3	0,8	0,85	0,9
1:2	0,65	0,7	0,8
1:1,5	-	0,5	0,6

Dimensionerande vattenhastighet, vattennivå och vattentryck för säkerhetsklass 3 ska bestämmas utifrån den mest ogynnsamma vattennivån, flöde eller porttryck med 100 års återkomsttid, samtidigt ska bankar nära strömmande vatten ha erosionsskydd upp till högsta högvatten med 100 års återkomsttid. Råd för prognostisering av porttryck görs enligt TRVINFRA-00230 och TRVINFRA-00231 där sannolikheten för att minst ett 100-årsvärde överskrids under en 100-årsperiod är 63 %. Prognostiseringen utgår ifrån en jämförelse av egna observationsmätningar under en längre tidsperiod.

3.3.3 Erosion; nu och i framtiden

Erosion och bortspolning utgör redan idag ett problem för järnvägsnätet i Sverige, främst utifrån ett kostnadsperspektiv. Detta i form av reparationer, bristande funktionalitet och förseningar kopplat till kraftiga vattenflöden (Trafikverket, 2019). Processerna är direkt kopplade till hydrologiska faktorer och påverkas hårt av kraftig nederbörd. Historiskt har bortspolning av banvallar som sedan orsakat allvarliga urspårningar varit ett faktum. Det är väldokumenterat och hände både vid Riksgränsen år 1999 och vid Skymossen 2015 (Statens haverikommission, 2024). Ett annat exempel som hänt mer i närtid är urspårningen mellan Iggesund och Hudiksvall som in-

träffade år 2023. Detta till följd av stora nederbördsmängder som föranledde underminering och ras av järnvägsbanken. Orsaken bakom detta och varför det kunde inträffa var på grund av att dräneringen på platsen var underdimensionerad och klarade därför inte av den mängd vatten som kom under ovädrets förlopp. Dessa händelser visar på att kraftiga vattenflöden i direkt anslutning till järnvägsanläggningar kan vara ett stort problem för infrastrukturen. Eftersom erosion ofta är en långvarig och svårupptäckt process, kan det vara svårt att upptäcka skadorna i tid. I dagsläget arbetar Trafikverket förebyggande för att liknande situationer inte ska uppstå och att konsekvenserna ska bli så begränsade som möjligt. Detta sker genom ökade resurser till klimatanpassningsåtgärder, underhåll av avvattningsystem och genom strategier där man tagit fram metodhandböcker för att riskbedöma ras, skred, översvämning, bortspolning och erosion (Trafikverket, 2019).

I framtiden räknar Trafikverket med att omfattningen av både erosion och bortspolning kommer öka markant till följd av ett förändrat klimat (Trafikverket, 2019). De största pådrivande effekterna som påverkar detta är den ökande nederbördsmängden och den ökande intensiteten utav regnen. Vädret kommer också bli mer ovisst och därför svårare att förutse, vilket är negativt ur perspektivet att akuta punktinsatser blir svårare att faktiskt genomföra. En annan viktig aspekt kring de höga vattenflödena är markanvändningen runt spårområdet. Rapporten antyder att avverkning i anslutning till järnvägsanläggningarna får direkta konsekvenser av den ökade vattenmängden som når anläggningen och skapar problematik ur ett erosionsperspektiv.

Erosion har därför gått från att bli ett lokalt underhållsproblem till att bli en viktig fråga nationellt kring klimatarbetet i framtiden. Denna fråga blir alltså väsentlig eftersom stora delar av järnvägsnätet är byggt under en tid då detta inte var lika omfattande och för att dimensioneringen för framtida klimat på många ställen är otillräcklig.



Figur 3.3: Urspårning av tåg på Ostkustbanan mellan Iggesund och Hudiksvall. En tydlig erosion av järnvägsbank på grund av kraftigt vattenflöde. Man skimtar även en avverkning i bakgrunden. (Statens haverikommission, 2024), CCBY 2.5 SE

3.4 Klimatförändringar

Jordens klimat skiftar under långa tidsperioder från istider till perioder med stora temperaturhöjningar (Naturskyddsföreningen, 2021). Jorden har haft möjlighet att återhämta och anpassa sig till dessa förändringar, däremot sker den globala uppvärmningen i en sådan snabb takt att ekosystemen inte hinner anpassa sig. Extremväder blir allt vanligare och mängden nederbörd kommer öka betydligt.

Idag är järnvägsbankar dimensionerade för att klara av nederbörd och vattenflöden utifrån återkomsttider för extremscenarier (Trafikverket, 2024). Regnintensitet beräknas med en klimatkfaktor på 1,3 för varaktighet under 60 minuter och 1,2 för varaktighet 1-24 timmar. Med hjälp av klimatkfaktorn kan Trafikverket ta hänsyn till framtida klimatkförändringar och anpassa dimensioneringen av infrastruktur efter den ökade mängden nederbörd (Trafikverket, 2019). Den hänsyn Trafikverket tar gällande klimatkadaptation av infrastruktur bygger på ett tidsperspektiv fram till år 2100, med utgångspunkt från FN:s klimatkpanel IPCC RCP-scenarier. IPCC har tagit fram olika RCP-scenarier för klimatkförändringen fram till år 2100 som SMHI har tolkat och applicerat för (SMHI, u. å-d). De olika RCP-scenarier (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6, RCP 8.5) står till grund för vilken utvecklingsbana utsläppen av koldioxid antas ha och är underlag för datorbaserade klimatkmodeller. Enligt Olsson m. fl. (2017b) dimensioneras idag anläggningar utifrån en klimatkfaktor på mellan 1.1 och 1.4. I framtiden är det dock mer rimligt att utgå från en högre faktor på mellan 1.3 och 1.4 under RCP 8.5.

SMHI tillhandhåller nationella och regionala kartor för klimatkscenarier RCP 4.5 och RCP 8.5 (Trafikverket, 2019). Trafikverkets hållning till dessa klimatkscenarier är i huvudsak att utgå från RCP 4.5 med undantag för bedömningar längs kusten till följd av havsnivåhöjningar där RCP 8.5 används.

3.4.1 Framtida klimatkscenarier och nederbördsmönster

För att modellera framtida klimatkutvecklingar tillämpar IPCC så kallade Shared socioeconomic pathways *SSP* (Lee & Romero, 2023). Dessa scenarier integrerar med socioekonomisk utveckling med olika nivåer av växthusgasutsläpp. Scenarierna delas upp i tre delar, lågutsläppsscenario, medelhögt utsläppsscenario och högutsläppsscenario. Dessa olika scenarier ger en indikation på olika varianter av framtida klimatkscenarier som i sin tur påverkar vilka framtida nederbördsmönster man kan förvänta sig.

Det hydrologiska kretsloppet drivs till stor del av atmosfärens förväntade termodynamik. För varje grad temperaturen i atmosfären ökar, ökar dess förmåga att bära vattenånga med 7 %, vilket innebär att större regnmängder ansamlas i atmosfären (Coumou & Rahmstorf, 2012). Klimatkmodeller indikerar en omfördelning av nederbörd (Lee & Romero, 2023). Högre latituder

såsom norden förväntas få en ökad total nederbördsmängd. En avgörande konsekvens indikeras vara att nederbörden i allt högre grad kommer falla mer intensivt. Den ökade intensiteten gör att mindre del av regnet kan infiltrera och höjer därmed risken för översvämningar.

3.4.2 Extremregn

Extremregn är ett brett begrepp som anger regnmängder som statistiskt sett förekommer sällan. Begreppet täcker alla typer av varierade regn som faller i klassen extrem nederbörd. Enligt klimatologi kan begreppet extremregn delas in i fyra olika kategorier av regn (Olsson m. fl., 2017a).

Skyfall: SMHI definierar skyfall som ett regn med en intensitet på 50 mm på en timme eller minst 1 mm på en minut. Trots skyfallens mer frekventa uppståndelse och de uppenbara samhällskonsekvenser anses kunskapen om skyfall vara begränsad. Dess småskaliga natur kräver en mycket hög detaljeringsnivå i observationsnät och vädermodellering vilket gör skyfall både svårt att mäta och modellera.

Extrem areell ett- och tvådygnsnederbörd ("Haldoregn"): Haldoregn beskrivs som extrema nederbördstillfällen som uppfyller strikta kriterier bestående av följande fyra punkter. Nederbördsmängden ska uppgå till minst 90 mm under 24 eller 48 timmar. Arean ska uppgå till en sammanhängande yta på 1000 km². Haldoregn anses som Sveriges värsta nederbördstillfällen med mycket regn under en längre period. Konsekvenser av detta har visat sig orsaka översvämningar och stor samhällsskada.

Extrem dygnsnederbörd: Extrem dygnsnederbörd avser högsta uppmätta nederbörd under ett dygn och består av data insamlat sedan 1881 från SMHI. Datan som uppmätts för denna typen av regn har varierat mellan 50 mm och 198 mm.

Skyfall med långa återkomsttider utifrån PMP: PMP står för *Probable Maximum Precipitation* och beskrivs i rapporten som skyfall med långa återkomsttider eller värsta skyfallet som kan inträffa i Sverige. På grund av att denna typ av skyfall är sällsynta och svåra att observera används PMP som verktyg för att fastställa skyfallets fysiskt möjliga maxnivå för en given plats.

3.4.3 Klimatförändringens påverkan på infrastruktur

Vägtransporter är en av de ledande faktorerna för ett ökat växthusgasutsläpp som accelererar den globala uppvärmningen och klimatförändringen (de Abreu m. fl., 2022). Samtidigt är väginfrastrukturen en av de sektorer som påverkas hårdast av klimatförändringen. Den mer intensifierade mängden extremväder som förväntas uppstå i samband med klimatförändringen sätter

stor press på infrastrukturen. Detta ger en indikation av att infrastruktur inte bara behöver vara pålitlig vid standardbelastningar utan också behöver kunna minimera omfattningen av väg- och bankskador under exceptionella väderförhållanden som ökad nederbördsintensitet, förändringar i nederbördsmönster och extrema väderhändelser.

Klimatförändringen skapar flera utmaningar i transportsektorn eftersom sektorn är mycket sårbar för väder- och klimatförhållanden (de Abreu m. fl., 2022). Effekterna av klimatförändringen förväntas ha en tydlig påverkan på infrastrukturens livslängd och transportsäkerhet. Strategier och anpassningsmetoder har diskuterats för att minska klimatförändringens påverkan på transportsystem och dess infrastruktur.

3.5 Skogsavverkning

Utöver klimatförändringarnas påverkan på järnvägen sker lokala förändringar i landskapet. Skogsavverkning är en lokal kritisk faktor som avlägsnar vegetation och naturlig upptagning av vatten. Examensarbetet fokuserar därför även på denna faktor och dess konsekvenser på infrastrukturen.

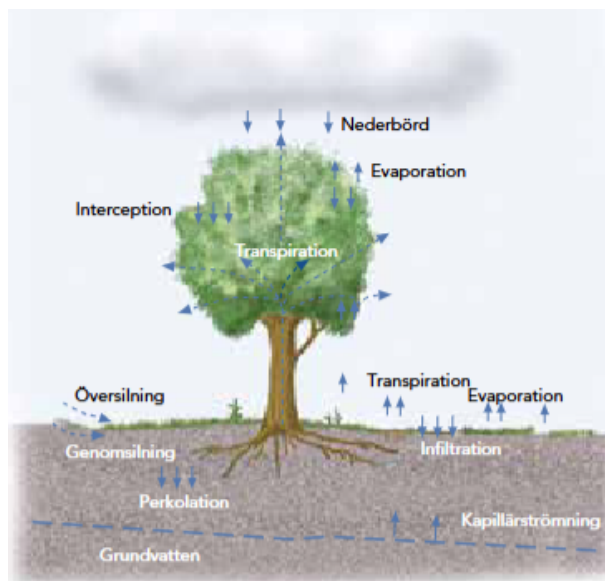
Avverkningen i Sverige har ökat stadigt under de senaste 50-åren. Från en nivå på 56 miljoner skogskubikmeter 1977 till dagens nivå på runt 90 miljoner skogskubikmeter (Skogsstyrelsen, u. å-a). Detta gör att skogsindustrin idag är en av Sveriges största basindustrier och sysselsätter runt 30 000 personer (Skogsstyrelsen, u. å-c). Sett till den totala avverkningsvolymen i Sverige så står Norrland och Götaland för drygt 35 % vardera av den totala volymen, medan Svealand står för cirka 30 %. Skogsavverkningen i Sverige består av 3 olika trädslag. Lövträd är den minst avverkade och utgör endast drygt 10 % av den totala volymen (Skogsstyrelsen, u. å-b). Tall är betydligt större och utgör cirka 32 % av det totala beståndet, medan granen dominerar med hela 58 %.

Att granen dominerar det svenska skogsbruket är en viktig detalj kopplat till hydrologin och vattenbalansen i landskapet, inte minst runt känslig infrastruktur. Detta eftersom forskning visar att barrskogar i jämförelse med lövskogar både har högre ”interception” men även ”evapotranspiration” (Inokoshi m. fl., 2023).

Interception: Är ett begrepp som beskriver hur mycket nederbörd som fångas upp av vegetationen och avdunstar innan det hinner nå marken (Sveriges skogsvårdsförbund & Michael Håkansson, 2000)).

Evapotranspiration: Är den kombinerade processen av vattenavdunstning från mark, andra ytor och transpiration från växter (Cordulus, 2025).

Transpiration: Är en process där vatten absorberas av växternas rötter, transporteras genom växten och släpps ut som ånga (Cordulus, 2025).



Figur 3.4: Illustration över de hydrologiska begreppen. Återgiven med tillstånd. (Svenskt vatten, 2016).

När skogsbestånden sedan avverkas begränsas dessa funktioner drastiskt. Det medför att marken blir fuktigare och att markytan behöver ta ett större ansvar för dessa delar vid kraftig nederbörd. Det medför även att avvattningsystemen i järnvägsanläggningarna som befinner sig intill områdena blir belastade hårdare, vilket medför risker för både försämrad stabilitet och överbelastade flöden i anläggningen. Detta eftersom högre vattenflöden och ett förändrat flödesmönster påverkar banvallen och andra viktiga delar av anläggningen. Skogen, dess livscykel och avverkningen kopplat till denna blir då en viktig pusselbit att förhålla sig till. Inte minst för att Sveriges totala yta utgörs av cirka 68 % skogsmark (Statistiska centralbyrån, 2023). Vilket innebär att järnvägsnätet uppskattningsvis bedöms löpa genom ungefär lika stor andel skogsdominerande landskap.

När det kommer till avverkning kan det ske på olika sätt. I praktiken är det främst gallring och slutavverkning som man pratar om. Vilken avverkningstyp man väljer beror till stor del var någonstans i skogens livscykel man befinner sig.

3.5.1 Slutavverkning

Slutavverkning eller föryngringsavverkning som det också kallas är det tillfälle då huvuddelen av trädbeståndet avverkas (Skogskunskap, 2025). Valet av avverkningsmetod styrs av hur det framtida trädbeståndet har planerats och hur platsen ska utformas när åtgärden är slutförd. I Sverige slutavverkas cirka 200 000 hektar skog om året, det utgör cirka 1 % av den totala skogsarealen. Slutavverkningen sker främst på tre olika sätt. Kalhuggning, fröträdsställning el-

ler skärmställning beroende på hur stor andel av skogen man väljer att avverka (Skogsstyrelsen m. fl., 2014).

3.5.1.1 Kalhuggning

Vid kalhuggning avverkas alla träd i det befintliga planerade beståndet samtidigt, förutom naturvårdsträd eller hänsynsytor (Skogsstyrelsen m. fl., 2014). Detta är det absolut vanligaste sättet att avverka på och det utgör cirka tre fjärdedelar av alla slutavverkningar. Efter att slutavverkningen är genomförd är det vanligaste sättet att föryngra beståndet genom manuell plantering. Efter en genomförd kalhuggning kan man i praktiken välja att plantera vilket svenskt trädslag som helst, detta eftersom möjligheten att markbereda ordentligt är ett faktum vid denna typ av avverkning.

3.5.1.2 Naturlig föryngring utifrån trädslag

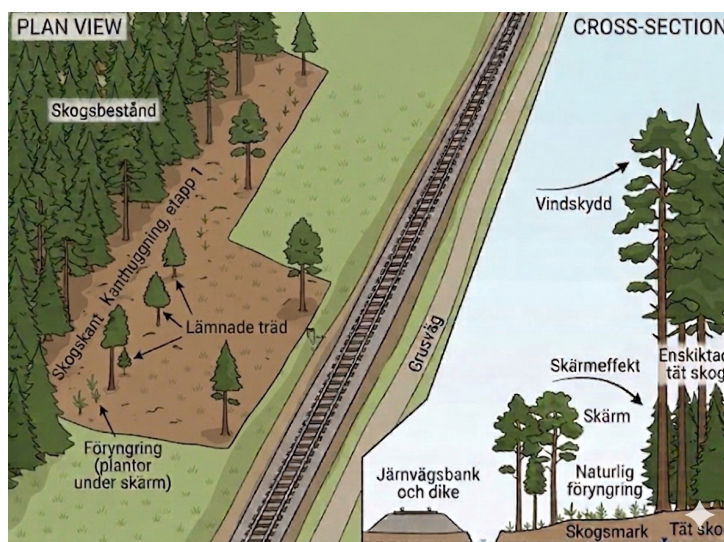
Det är också vanligt att avverka på ett sätt som bygger mer på naturlig fröspridning och att föryngra beståndet genom att anpassa metoden till den specifika trädsorten.

Tallbestånd: Här används ofta fröträdsställning där mellan 50–150 träd lämnas kvar per hektar som frökällor till det nya beståndet (Skogsstyrelsen m. fl., 2014). Vanligtvis behövs markberedning för att metoden ska fungera på ett effektivt sätt, speciellt vid torra och friska marker.

Granbestånd: Här sparas betydligt fler träd än vid fröträdsställningen. Träden som sparas fungerar som ett skyddande tak över dom nya plantorna och fungerar väl mot den konkurrerande markvegetationen. De sparade träden avverkas sedan i etapper för att skydda föryngringen i så hög utsträckning som möjligt. Denna metod kallas skärmställning.

3.5.1.3 Etappvis avverkning inom trakthyggesbruk

I ett trakthyggesbruk delas skogen ofta in i olika trakter (bestånd) som har ungefär samma livscykel (Mats Hannerz m. fl., 2025). Detta gör att beståndet som avverkas och föryngras ofta genomförs samlat inom dessa ytor. Det innebär att det gamla beståndet avverkas gradvis, vilket skapar en övergångsfas mellan generationerna på den befintliga platsen. Om avverkningen sker genom etappvis slutavverkning inom trakthyggesbruk överges det traditionella sättet för avverkning. Det innebär att avverkningen av beståndet sker genom mindre ingrepp i form av luckhuggning, alternativt kanthuggning. Dessa metoder ingår i Skogsstyrelsens definition av hyggesfritt skogsbruk som innebär att marken sköts på ett sådant sätt att den alltid är trädbevuxen utan några större kalhuggna ytor. Trots att dessa metoder finns dokumenterade i skoglig litteratur har de i modern tid sällan tillämpats i praktiken, med undantagsfall i försökssyfte (Skogsstyrelsen m. fl., 2014)



Figur 3.5: Etappvis avverkning i form av kanthuggning. (Skapad med Google Gemini 2026)

3.5.2 Genomförande

När markägaren har bestämt sig för att genomföra en avverkning påbörjas planeringen av själva genomförandet. Här fastställs bland annat var och hur virket ska transporteras ut från skogen (Skogsstyrelsen m. fl., 2014). Detta görs först genom att studera kartmaterial och annan tillgängliga data från området. Efter detta besöks området och kompletteras med nödvändiga data som fattas eller som behöver kontrolleras. Den som planerar för den kommande avverkningen behöver ha god förståelse för hur skogsbruk bedrivs. Men också ha god kännedom om naturvårdsbiologin och kulturmiljön i området. Detta för att genomförandet ska bli så bra ur både ett miljömässigt och ekonomiskt perspektiv. Vid kännedom om området markeras kritiska platser ut med markeringsband. Platserna kan vara överfarter som byggs i samband med avverkningen, men också områden som är speciellt känsliga för stora påfrestningar.

Vid avverkning intill en järnvägsanläggning, en så kallad trädsäkring, blir genomförandet annorlunda jämfört med hur processen går till på mer allmänna platser. Detta för att skydda anläggningen och dess delar mot skador som kan komma till följd av genomförandet (Lundh, 2015). I Trafikverkets styrdokument "BVS 1516" beskrivs vilka typer av maskiner som ska användas vid avverkning intill en järnvägsanläggning och hur genomförandet ska gå till. Det finns fem olika metoder som används vid avverkning beroende på utgångsläge. Vanligast är att metod 1 används, vilket innebär fällning med skördare. Det är då krav på att maskinerna i samband med en slutavverkning ska väga minst 20 ton och framföras av någon med minst två års erfarenhet. Detta blir en viktig och tänkvärd aspekt kring maskiner och dess tyngd intill järnvägskonstruktionen ur både en stabilitets- och avvattningssynpunkt. Tunga maskiner intill anläggningen påverkar jordens egenskaper och hur det naturliga avrinningssystemet fungerar, vilket är viktiga aspekter att ta hänsyn till och som beskrivs och förklaras mer i rapporten.

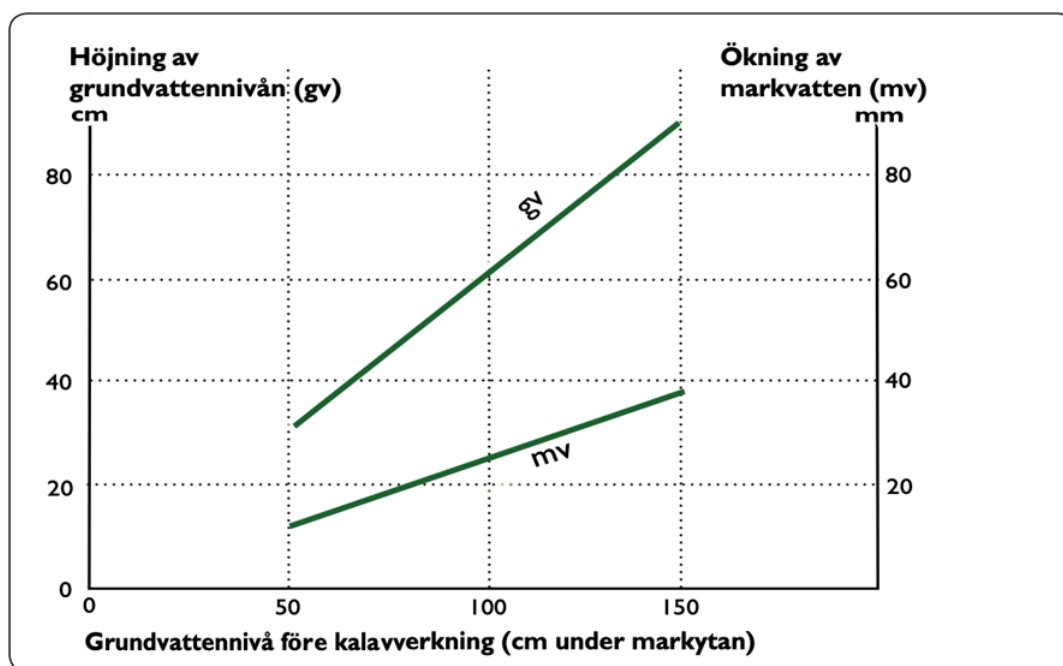
3.5.2.1 Körmonster

En viktig del av avverkningsprocessen är hur maskinerna ska framföras på den specifika platsen. Vägarna bestäms primärt av entreprenören själv och görs vid avverkningsstart (Skogsstyrelsen m. fl., 2014). Det är viktigt att ta hänsyn till vilken mark och förhållande som kommer vara vid avverkningen. Risken är stor för spårbildning och erosion vid mer finkorniga jordar, men också stor vid hög fuktighet och generellt blötare marker. En annan viktig aspekt är jordlagrets tjocklek som kommer belastas, samt djupet till fast bättre material. Åtgärder till detta är att man risar upp vägar, bygger körbroar eller lägger stockmattor vid speciellt känsliga områden. En annan bra och viktig åtgärd är att planera avverkningen till kallare perioder. Detta då är marken är hårdare vilket minskar risken för allvarliga körskador.

Vid körning intill järnvägsanläggningar behöver man förhålla sig till uppsatta krav och regler som Trafikverket har utformat i dokumenten ”BVS 1515 och BVS 1516”. Man får exempelvis aldrig fälla träd så dem kommer närmare spåret än 2,2 meter och samtidigt ta hänsyn till den terräng och miljö som finns vid den avverkade platsen, för att inte påverka naturliga vattendrag och andra känsliga platser. Det är därför viktigt att man planerar avverkningen intill anläggningen noga innan den påbörjas och väljer avverkningsmetod utefter förutsättningar på platsen.

3.5.3 Avverkningens påverkan på vattnet

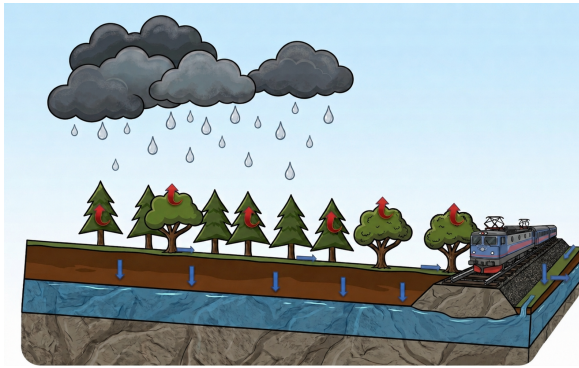
Skogsavverkningen i Sverige har generellt sett en positiv inverkan på markens produktionsförmåga (Skogsstyrelsen m. fl., 2014). Negativa effekter kan dock uppstå, framför allt i form av den hydrologiska förändringen som leder till en höjning av grund- och ytvattnet i det avverkade området. Dessa effekter sker främst på grund av interceptionen minskar kraftigt vilket leder till att mer nederbörd når marken, i stället för att tas upp av växtligheten som funnits på platsen innan. En annan anledning är att trädens transpiration försvinner, vilket gör att den naturliga dräneringen försvinner från den avverkade platsen. Även om avdunstningen från marken och vegetationen stiger, når den inte upp till de nivåer som tidigare kom från trädets aktiva och passiva avdunstning. Konsekvenserna av detta blir att vattenhalten i jorden blir högre och att grundvattennivån stiger. Enligt Lundin (1979) ökade grundvattennivåerna upp till 90 cm vid en studie gjord i Kloten-området i Västermanland (se bild 3.6). Höjningen av grundvattennivåerna är oftast mest markant under torrperioderna, då grundvattennivåerna är som lägst (Sojka m. fl., 2020). Detta medför i sin tur en ökad avrinning i området och en mer svampig mark, vilket förstärker körskadorna i området.



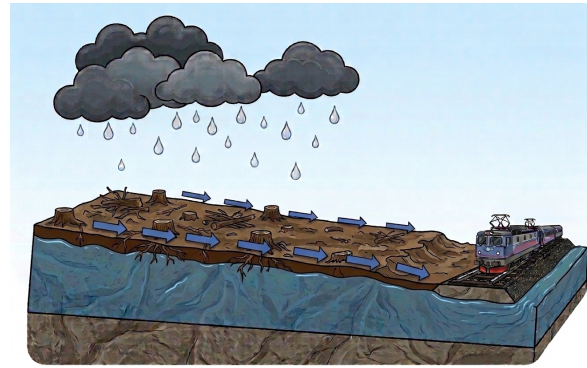
Figur 3.6: Förändring av markvatten och grundvattens nivå efter en kalavverkning. En ökning på markvatten på 1 mm motsvarar 1 liter per m² markyta. Kloten-området, Västmanland. (Lundin, 1979). Återgiven med tillstånd.

I Sverige brukar avrinningen från skogsdominerande områden vara mellan 33–50 % av den totala nederbörden (Skogsstyrelsen m. fl., 2014). Vid slutavverkning genom kalhyggen kan effekterna bli att avrinningen i det avverkade området ökar med upp till 100 % de första åren. Enligt Guillemette m. fl. (2005) kan även flödestopparna öka med så mycket som 54–63 % när avverkningen överstiger 85 % av ett avrinningsområde. Detta är särskilt kritiskt vid dimensionering av infrastruktur eftersom att studien visar att vattnet snabbare når fram till anläggningen som följd av att skotningsvägar och diken kopplas direkt till bäcksystemet på platsen.

Ökningen sjunker sedan successivt i takt med att det föryngrade beståndet växer och vattenbalansen blir återställd när beståndet nått välsluten ungskog (Skogsstyrelsen m. fl., 2014). När det planterade beståndet övergått till en mer vuxen skog har vattenbalansen i området återgått till det normala. Om markskador i form av djupa körspår har uppstått i avverkningsområdet och blottlägger en mer kompakterad mineraljord, kan detta medföra att en mer koncentrerad ytavrinning uppstår. Vilket gör att erosion av partiklar och bortspolning av material vid kraftiga regn blir en negativ konsekvens av avverkningen.



Figur 3.7: Vattnets kretslopp innan avverkning. Röda pilar är inteception och transpiration från vegetationen. Blå pilar är grundvattenbildning och ytavrinning. (Skapad av Google Gemini 2026).



Figur 3.8: Avverkad skog; här är grundvattennivån högre och marken hårt packad. Detta ger en större ytavrinning och högre flöde. (Skapad av Google Gemini 2026).

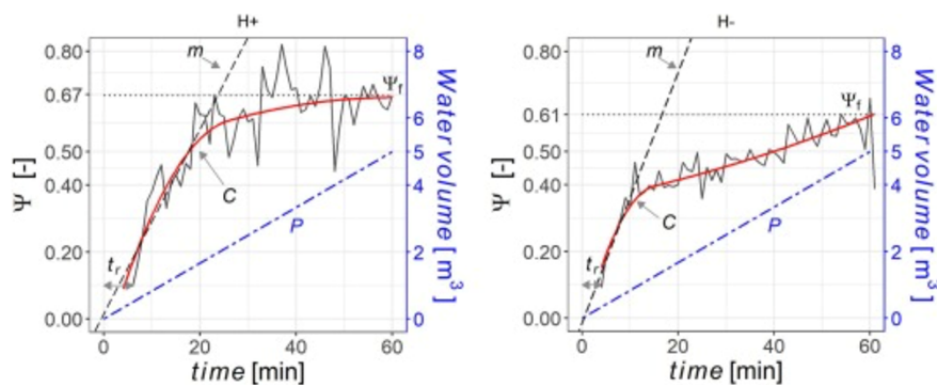
3.5.4 Avverkningens påverkan i form av förändrad avrinningskoefficient

Avrinningskoefficienten beskriver förhållandet mellan nederbörd och den del av vattnet som lämnar ett område i form av ytavrinning (Behringer m. fl., 2025). Den definieras som kvoten mellan ytavrinning (Q) och tillförd nederbörd (P) enligt följande ekvation:

$$\varphi = \frac{Q}{P} \quad (3.8)$$

Som tidigare nämnts kan avrinningen öka beroende på körmönster och hur skogen avverkas. Tung maskinell avverkning påverkar avrinningsmönstret mest (Behringer m. fl., 2025). Detta för att markpackningen leder till att porositeten i marken minskar vilket i sin tur påverkar infiltrationsförmågan. När infiltrationen i marken minskar leder det till att mer vatten rinner på ytan av marken, som bidrar till ökande avrinningskoefficient i området.

Avrinningskoefficienten som uppstår till form av maskinell avverkningen har enligt *Behringer m.fl* visat sig kunna öka markant. I deras studie uppmättes avrinningskoefficienter upp till 0,67 på delar av områdena som genomgått en slutavverkning. Testerna utfördes direkt efter slutavverkningen samt ett år senare där båda resulterade i en avrinningskoefficient på 0,67. Detta sker då marken blivit helt mättad under en regnperiod på 60 minuter. Vilket innebär att en väldigt stor del av nederbörden omvandlas till ytavrinning. Värdet kan jämföras med svenskt vattens publikation P110, där avrinningskoefficienten för flack, tätbevuxen skogsmark ligger på mellan 0,0–0,1. Detta blir alltså en markant ökning som kan leda till problem i form av ökade vattenflöden på platser som faktiskt inte klarar av detta.



Figur 3.9: Graf som visar hur avrinningskoefficienten ökar i takt med att nederbörden i området ökar. H+ är avverkningen med tunga skogsmaskiner (29,5 t respektive 24,5 t + last). H- är en avverkning med lättare skogsmaskiner (23,5 t respektive 21,5 t + last) (Behringer m. fl., 2025) CC-BY.

Avrinningskoefficienten har en avgörande roll vid dimensionering av avvattningssystemet längs järnvägsnätet. För järnvägsinfrastrukturen blir detta en kritisk faktor, speciellt efter att en avverkning är genomförd.

4

Platsbeskrivning

4.1 Platsbeskrivning vid Aspen längs västra stambanan

4.1.1 Områdesbeskrivning och infrastruktur

Fallstudien innefattar den del av Västra stambanan som går längs sjön Aspen, 15 km öster om centrala Göteborg och tillhör Lerums kommun. Järnvägsbanken är anlagd på en begränsad landremsa mellan sjön Aspen och en brant terräng med sydlig stigning. Parallellt med järnvägen följer Jonseredsvägen och trädbeståndet i området består huvudsakligen av lövträd i form av asp och björk.

Järnvägsanläggningen som är ett stycke 1850-tals ingenjörskonst, består idag av ett dubbelspår som delvis beskrivs och regleras enligt TDOK 2015:0198 samt TRVINFRA-00019 (Trafikverket, 2020b). Västra stambanan är en av Sveriges mest trafikerade sträckor och den ökade trafikbelastningen har under de senaste decennierna lett till att den maximala kapaciteten är nådd (Trafikverket, 2026). Mellan 2025-2027 planeras stora renoverings- och stabiliseringsåtgärder längs denna sträcka för att säkra framtida kapacitet och robusthet.

Eftersom Västra stambanan och Jonseredsvägen är samlokaliserade på en begränsad yta är arbeten och underhåll svåra att genomföra. Det är även komplicerat eftersom området har höga naturvärden, däribland alsumpskog och grova ädelträd som begränsar möjligheterna till ingrepp för ombyggnation eller nybyggnation i området (Lerums kommun, 2026).

4.1.2 Topografi, släntgeometri och hydrologiska förutsättningar

Längs Västra stambanan lutar stora delar av området ner mot sjön med cirka åtta till tio graders lutning. Efter ombyggnationen av Jonseredsvägen och omplacerade trummor uppstod det nya flödesvägar för vattnet att ta sig ner längs berget. Detta har lett till att befintliga trummor i järnvägsbanken inte kunnat hantera det nya vattenflödet som uppstått och översvämningar har blivit ett förekommande problem längs sträckan vid Aspen.

Det speciella läget för järnvägsbanken i detta område gör att anläggningen ligger i direkt kontakt med öppet vatten. Aspens vattennivå regleras av Partille Energi genom en damm placerad i Aspens utlopp västerut. Detta leder till att vattennivån är någorlunda konstant och inga större skillnader i nivå bör förväntas.

Trots detta förekommer det mindre skillnader i nivå som påverkas av inloppet från intilliggande sjön, Mjörn (Partille Energi, 2026). Torra perioder leder dels till mindre reglering från Mjörn och att vattennivån sjunker som en konsekvens av torkan.

All infrastruktur utsätts för olika yttre påverkansfaktorer som sliter och försämrar infrastrukturens stabilitet över tid. Vid en snabb vattennivåsänkning orsakad av torka kan vattennivån sjunka snabbare än vad vattnet inuti banken hinner rinna undan. Detta orsakar att banken förlorar stöd från vattnet samtidigt som vattnet inuti banken skapar utåtriktade krafter för att stabilisera sig.

Vågrörelser från Aspen kan antas vara minimala, men kraftig vind från norr till söder kan orsaka vågor som slår mot banken som i sin tur kan erodera och spola bort delar av banken.

Ytterligare hydrologiska påfrestningar är tjällyft där vattenporer fryser till is och expanderar vilket leder till att spåren lyfter (Trafikverket, 2020a). Ofta inträffar uppfrysningen ojämnt där ena delen av rälsen lyfter mer än andra och orsakar skevningsfel som i värsta fall kan leda till att tåget spårar ur.



Figur 4.1: Bild över området och sträckan som undersökts. Kartdata: (OpenStreetMap, 2026), CC BY-SA 2.0.

5

Genomförande

5.1 Fallstudien

Studien inleddes med att identifiera geografiska områden där riskfaktorer för järnvägsolyckor bedömdes vara förhöjda. Som utgångspunkt för urvalet användes platsanalyser av historiskt olycksdrabbade järnvägssträckor. Genom dessa analyser identifierades ett korrelerande mönster mellan kritiska olyckspunkter och specifika topografiska förhållanden. Utifrån analyserna bestämdes sambandet där järnvägsspår belägna i direkt anslutning till vatten med en intilliggande stigande slänt vara en riskpunkt för framtida olyckor.

Med dessa parametrar som grund genomfördes en visuell identifiering via digitala karttjänster för att lokalisera liknande miljöer. Valet föll slutligen på en del av Västra stambanan i Lerums kommun, där järnvägen löper längs sjön Aspen. Platsen valdes utifrån likheten av de eftersökta karakteristiska dragen och därmed utgjorde en lämplig grund till skapandet av typmodellen.

För att bättre förstå hur typmodellen ska formos genomfördes en omfattande platsanalys. Syftet var att fördjupa förståelsen för de externa påfrestningar som bidrar till att definiera området som en riskpunkt. Arbetet strukturerades genom följande metodsteg:

- **Geoteknisk utredning:** En analys av markförhållanden och stabilitet genomfördes för att undersöka platsens fysiska förutsättningar.
- **GIS-modellering:** En digital modell upprättades i programvaran QGIS för att visualisera och analysera topografisk data samt extrahera höjddata från berg och mark till Geostudio.
- **Konsultation med sakkunniga:** Diskussioner fördes med yrkesverksamma geotekniker med specifik lokalkännedom om området för att diskutera riskfaktorer och vad som gör denna plats mer riskdrabbad.

5.1.1 Geoteknisk undersökning

I samband med fallstudien genomfördes en geoteknisk undersökning, vilket innefattade inhämtning av geotekniska data från borrhål samt kartunderlag för att ta ut tvärsektioner från programvaran QGIS. Kartmaterialet som användes i programvaran är hämtat från SLU:s karttjänst Geodata Extraction Tool (GET). Informationen från tvärsektionerna och borrhålen på den valda platsen utvärderades grafiskt från ritningar. Informationen är tagen längs Västra stambanan från sektion 442+460 till sektion 442+860 med cirka 67 meters mellanrum mellan sektionerna.

Datan som togs fram från sektionerna var densitet (ρ), oreducerad skjuvhållfasthet (τ), grundvattennivå samt konflytgräns (w_L) som utvärderades mot nivå. Skjuvhållfastheten kompletterades sedan med en CPT-sondering i närområdet av vald plats. För att sedan reducera skjuvhållfastheten från sektionerna användes gällande formler enligt Trafikverkets infrastrukturregelverk (Trafikverket, 2025a).

$$\tau_u = \tau_f \cdot \left(\frac{0,43}{w_L} \right)^{0,45} \quad (5.1)$$

När hållfastheten reducerats skapades trendlinjer för den reducerade skjuvhållfastheten och densiteten i området.

I rapporten har samtliga parametrar utvärderats mot nivå i stället för djup. Referenssystemet som används är det svenska systemet SWEREF 99. Varför nivå användes i stället för djup är främst för att få en större helhet hur jordlagerföljderna ser ut och följer landskapet i området. Det är också mer fördelaktigt att utgå från nivå om platsen har utsatts för ingrepp där jordlagren blivit störda och bearbetade under tidens gång, detta eftersom man får helhetsperspektivet i den gemensamma grafen över området.

Utöver hållfasthetsparametrarna baserades modellen på jordlagerföljdskartor och brunnsarkiv från SGU. För att göra mera realistiska jordlagerföljder och grundvattennivåer kompletterades data i området med branschdokument samt erfarenhetsbaserad kunskap från geotekniker i det lokala området (C. Ahl, personlig kommunikation, 25 mars, 2026).

Samtliga jordlager, materialmodeller, topografin och antaganden bifogas i Appendix A.

5.1.2 Modellering

Modelleringen av banken utfördes i programvaran SLOPE/W i GeoStudio. Programmets beräkningar baseras på gränstillståndsmetoden (Limit Equilibrium Method) där Morgenstern-Price beräkningsmodell tillämpas. Modellens utformning byggdes upp utifrån höjddata från Lantmäteriets nationella höjdmodell, extraherad via QGIS, och generaliserades därefter för att representera större delar av Västsverige. Järnvägsbanken modellerades som en förenklad typmodell utifrån Trafikverkets typsektioner för banker bestående av utgrävning fylld med grovkrossad sprängsten och tryckbank för att motverka ras ner i intilliggande sjö, se Appendix C. I linje med detta antogs materialvalet, jordlagerföljd och parametervärden mer generella värden, se Appendix B.

5.1.3 Simulering

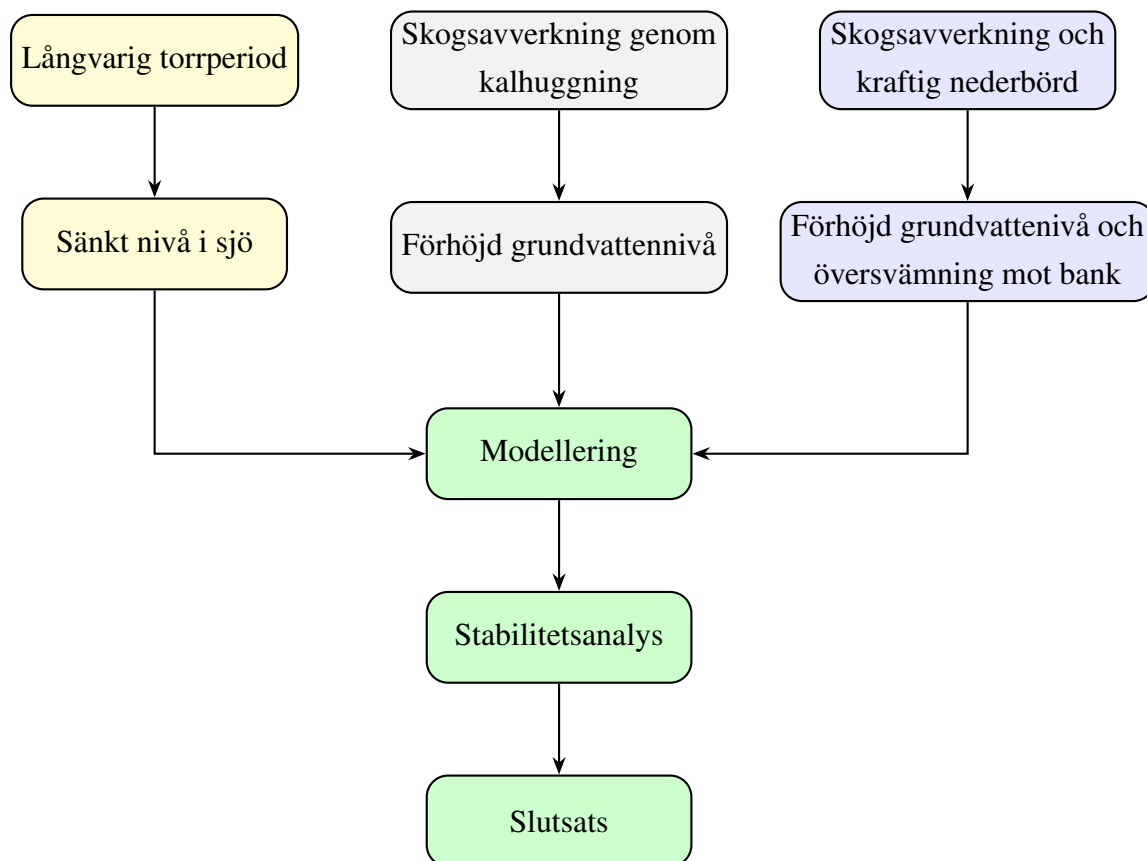
För att utvärdera järnvägsbankens stabilitet under varierande hydrologiska förhållanden utfördes simuleringar i programvaran Slope/W. Fokuset för stabilitetsanalysen är att undersöka hur järnvägsbankens stabilitet är och förändras utifrån ett verklighetsnära grundscenario (a) och tre teoretiska scenarier (b,c,d). Samtliga teoretiska scenarier är uppskruvade för att ge tydligare resultat samt testat mot varierande geotekniska förhållanden, med och utan tryckbank samt med och utan torrskorpa.

- **Scenario a – Grundscenario:** Grundmodellen för vår teoretiska geometri med vanlig vattennivå i sjön och ca 2 m djup grundvattennivå.
- **Scenario b – Torka:** Andra scenario simulerade en period av långvarig torka, vilket modellerades genom en sänkt grundvattennivå i marken samt en reducerad vattennivå i den intilliggande sjön. Syftet var att undersöka hur minskat portryck och förändrade stödkrafter från sjön påverkar bankens stabilitet.
- **Scenario c – Skogsavverkning:** Tredje scenariot representerar en utförd skogsavverkning genom kalhuggning som bidrar till en höjd grundvattennivå i marken enligt kapitel 3.5.3. Detta modellerades genom en förhöjd grundvattennivå med cirka 1 meter nivåskillnad.
- **Scenario d – Skogsavverkning i kombination med extremregn:** Fjärde scenariot representerar ett extremscenario med intensiv nederbörd utöver genomförd skogsavverkning. Extremregnet förväntas härmed vara så intensivt att en översvämning intill järnvägsbanken simuleras.

Se Appendix C för de resulterande modellerna för respektive scenario.

5.1.4 Arbetsgång modellering

Här visas en överblick av arbetsgången från modelleringen utifrån de tre typfallen examensarbetet undersökt. För att se en visuell bild hur delar av simuleringen går till i praktiken, se 3.7.



5.2 Flödesberäkning

5.2.1 Flödesökning till följd av skogsavverkning

För att beräkna flödesökningen som uppstår valdes två studieområden intill Aspen vid järnvägsbanken där rationella metoden tillämpats, se figur 5.1. Avrinningsområdet som studerats har varit 4,5 respektive 8 hektar stora. Beräkningarna har gjorts i två scenarier: Ett referensscenario med skogstäckte och avrinningskoefficienter enligt Svenskt Vatten P110 och ett extremscenario där skogsmarken antas vara kalhuggen med tunga maskiner under våta förhållanden och avrinningskoefficient enligt Behringer m. fl. (2025) från kapitel 3.5.4. Arbetsgången för beräkningarna är tagna från boken *Hydraulik för samhällsbyggare* (Bondelid Mia & Häggström Steffen, 2018). Rationella metoden har valts för att följa Trafikverkets dimensioneringskrav och för att tydligt ge en kvantitativ jämförelse från effekterna av skogsavverkningen på platsen.



Figur 5.1: Avrinningsområdena och dess utbredning ner mot västra stambanan och sjön Aspen (OpenStreetMap, 2026), CC BY-SA 2.0.

5.2.2 Beräkning av flöde kopplat till avverkning och 100-års regn

Från *flöde.se*, ett flödesberäkningsprogram, har avrinningsområden valts ut och studerats mer i detalj. De två studerade avrinningsområdena består av 96 % respektive 54 % skogsbelagd mark. Förutsättningarna för flödet på marken i de valda studieområdena har antagits vara *grunda diken* och hastigheten i de båda områden har då antagits till 0,2 m/s enligt tabell 3.2. Återkomsttiden (T) antas i de båda områdena vara 100 års-scenarier av regn som pågår under en varaktighetstid på 60 minuter. Bild över de studerade områdena visas i figur 5.1.

Efter att hastigheten, återkomsttiden och varaktigheten bestäms beräknades intensiteten. Intensiteten för de båda avrinningsområdena beräknades enligt ekvation 3.2.

Tabell 5.1: Intensitet i respektive avrinningsområde.

Område	Varaktighet [min]	Koncentrationstid [min]	Intensitet [$l/s \cdot ha$]
A	60	49,4	149,5
B	60	52,5	149,5

På grund av att koncentrationstiden i de båda delområdena är kortare än regnets varaktighet har intensiteten för de båda delområdena beräknats utifrån en varaktighet på 60 minuter. Genom att behålla intensiteten konstant för båda delområdena blir markanvändningen beräkningens enda

avgörande faktor. Detta ger en tydlig bild över hur skogsavverkningen påverkar avrinningen utan att resultatet påverkas av skillnaden på regnets varaktighet och då också intensitet.

Den reducerade arean beräknades sedan för att se hur mycket av den totala arean som bidrar med avrinning vid regnhändelsen. Beräkningen av den reducerade arean i varje delområde redovisas i tabell 5.2 och 5.3.

Tabell 5.2: Reducerad area vid område A.

Delområde	Area [ha]	φ	$A_{\text{red, före avverkning}}$ [ha]	$A_{\text{red, efter avverkning}}$ [ha]
Exploaterad mark	0,1	0,7	0,07	0,07
Skogsbeklädd mark	4,3	0,1	0,43	-
Kalhygge (avverkat)	4,3	0,67	-	2,88
Öppen mark	0,1	0,1	0,01	0,01
Total summa	4,5	-	0,51	2,96

Tabell 5.3: Reducerad area vid område B.

Delområde	Area [ha]	φ	$A_{\text{red, före avverkning}}$ [ha]	$A_{\text{red, efter avverkning}}$ [ha]
Exploaterad mark	1,2	0,7	0,84	0,84
Skogsbeklädd mark	5,4	0,1	0,54	-
Kalhygge (avverkat)	5,4	0,67	-	3,69
Åker	0,4	0,1	0,04	0,04
Öppen mark	1,0	0,1	0,10	0,10
Total summa	8,0	-	1,52	4,57

Klimatfaktorn antogs enligt tabell 3.3 till 1,4 och används i beräkningen för samtliga fall. Detta då västra stambanan är dimensionerad för en teknisk livslängd på 120 år och för att varaktigheten är mellan 0-24 timmar.

Flödet för respektive område beräknades sedan med rationella metoden enligt ekvation 3.1 ner mot banken. Vid beräkningen används en reducerad yta i stället för att dela upp ekvationen efter $A_{\text{hårdjord}}$ samt $A_{\text{infiltrerbar}}$, detta för att bättre anpassa arbetsgången enligt boken *Hydraulik för samhällsbyggare* (Bondelid Mia & Häggström Steffen, 2018).

6

Resultat

Detta kapitel presenterar resultatet från den stabilitetsanalys som utförts i samband med skogsavverkning och kraftig nederbörd. Analysen är gjord utifrån antagandet att grundvattennivån stiger vid slutavverkning genom kalhuggning. Kapitlet redovisar också hur en förändrad avrinningskoefficient till följd av skogsavverkning påverkar flödena som kan uppstå vid en 100-års händelse intill järnvägsanläggningen vid Aspenområdet.

6.1 Resultat av flödesberäkningen

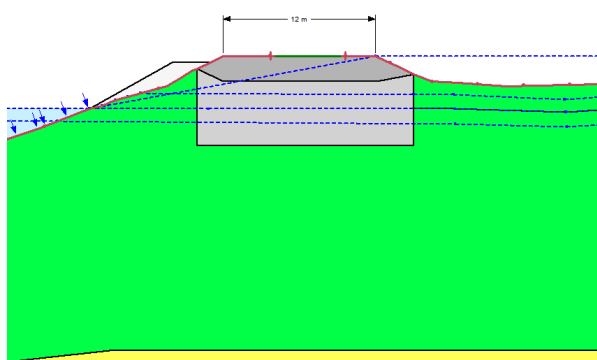
Resultatet av det normala flödet, flödesökningen samt den procentuella ökningen vid 100-års regnet redovisas i tabell 6.1. Det påvisade maxflödet i område A uppgår till 479 % i förhållande till normalflödet, medan maxflödet i område B påvisade en ökning med 201 %.

Tabell 6.1: Normalflöde, maxflöde (efter avverkning) och procentuell ökning för respektive avrinningsområde.

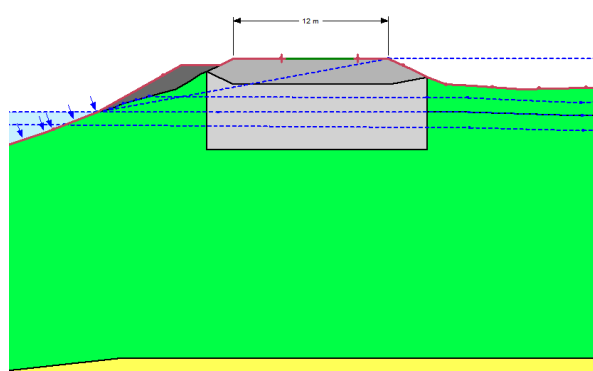
Område	Normalflöde (Q_{Normal}) [l/s]	Maxflöde ($Q_{Avverkning}$) [l/s]	Procentuell ökning [%]
A	107	620	479
B	318	957	201

6.2 Bankens stabilitet

Genom stabilitetsanalyser som utförts i programvaran GeoStudio har säkerhetsfaktorer för de olika simulerade scenarierna fastställts. Resultatet presenterar säkerhetsfaktorn för varje scenario och jämförs med trafikverkets krav på stabilitet för säkerhetsklass 3, se avsnitt 3.1.3.3. Säkerhetsfaktorn redovisas för odränerad analys och kombinerad analys med och utan torrskorpa samt med och utan tryckbank för de 4 olika scenarierna, se avsnitt 5.1.3



Figur 6.1: Grundscenario utan tryckbank där de blå streckade linjerna representerar scenario (a-d).



Figur 6.2: Grundscenario med tryckbank där de blå streckade linjerna representerar scenario (a-d).

6.2.1 Stabilitetsanalys, kombinerad analys

6.2.1.1 Analys av säkerhetsfaktor för bankområde med och utan torrskorpa

Samtliga säkerhetsfaktorer som erhållits av GeoStudio för de fyra scenarier presenteras i tabell 6.2 och 6.3. Säkerhetsfaktorerna som erhållits för samtliga scenarier underkänns enligt Trafikverkets krav på säkerhetsfaktor för kombinerad analys för konstruktioner i säkerhetsklass 3, $F \geq 1,4$. Torrskorpan påvisar marginell försämring av stabiliteten och kan anses vara obetydlig, vilket pekar på att bankens känslighet inte är beroende om marken består av en torrskorpa eller inte. Vidare påvisar resultaten av säkerhetsfaktorerna att långvarig torka (b) och översvämning intill bank (d) utan tryckbank ger en försämring av bankens stabilitet på 5–6 % och med tryckbank en försämring på 4–5 %. Enbart en grundvattenhöjning orsakad av skogsavverkning orsakar en stabilitetsförsämring på cirka 1 %. Varför säkerhetsfaktorn försämras med tryckbank vars uppgift är att ge banken mer stabilitet diskuteras i 7.1.4.

Tabell 6.2: Säkerhetsfaktor för bankområde utan torrskorpa. Presenteras med och utan tryckbank samt procentuell stabilitetsförändring mot grundscenario.

Scenario	Säkerhetsfaktor utan tryckbank	Förändring [%]	Säkerhetsfaktor med tryckbank	Förändring [%]
Grundscenario	1,34	-	1,28	-
Långvarig torka	1,26	-6,2	1,22	-5,1
Höjd grundvattennivå, skogsavverkning	1,33	-0,8	1,27	-0,9
Höjd grundvattennivå, skogsavverkning, översvämning	1,27	-5,8	1,23	-4,5

Tabell 6.3: Säkerhetsfaktor för bankområde med torrskorpa. Presenteras med och utan tryckbank samt procentuell stabilitetsförändring mot grundscenario.

Scenario	Säkerhetsfaktor utan tryckbank	Förändring [%]	Säkerhetsfaktor med tryckbank	Förändring [%]
Grundscenario	1,33	-	1,28	-
Långvarig torka	1,26	-6,1	1,21	-5,2
Höjd grundvattennivå, skogsavverkning	1,32	-0,8	1,26	-1,0
Höjd grundvattennivå, skogsavverkning, översvämning	1,26	-5,6	1,22	-4,5

6.2.1.2 Analys av säkerhetsfaktor för enbart bank med och utan torrskorpa

Samtliga säkerhetsfaktorer som erhållits av GeoStudio för de fyra scenarier presenteras i tabell 6.4 och 6.5. Säkerhetsfaktorerna som erhållits vid stabilitetsanalys av enbart järnvägsbanken godkänns med bra marginal för de krav Trafikverket har på säkerhetsfaktor för kombinerad analys för konstruktioner i säkerhetsklass 3, $F \geq 1,4$. Likt analysen av hela området påvisar torrskorpan ingen väsentlig försämring av säkerhetsfaktorn när enbart banken studerades. Till skillnad från stabilitetsanalysen på hela området påvisar säkerhetsfaktorn en förbättring av bankens stabilitet med tryckbank intill. Scenario (b) ökar bankens stabilitet med 5–6 % utan tryckbank och 4–5 % med tryckbank. Vidare visar grundvattenhöjningarna i scenario (c) en försämring på 5–7 % utan tryckbank och cirka 6 % med tryckbank. Resultatet av scenario (d) konstaterar en betydande försämring med en stabilitetsförlust uppemot 19 % utan tryckbank och 23 % med tryckbank.

Tabell 6.4: Säkerhetsfaktor för enbart bank utan torrskorpa. Presenteras med och utan tryckbank samt procentuell stabilitetsförändring mot grundscenario.

Scenario	Säkerhetsfaktor utan tryckbank	Förändring [%]	Säkerhetsfaktor med tryckbank	Förändring [%]
Grundscenario	2,73	-	3,33	-
Långvarig torka	2,89	+6,1	3,51	+5,3
Höjd grundvattennivå, skogsavverkning	2,54	-7,3	3,13	-6,4
Höjd grundvattennivå, skogsavverkning, översvämning	2,31	-18,0	2,82	-18,1

Tabell 6.5: Säkerhetsfaktor för enbart bank med torrskorpa. Presenteras med och utan tryckbank samt procentuell stabilitetsförändring mot grundscenario.

Scenario	Säkerhetsfaktor utan tryckbank	Förändring [%]	Säkerhetsfaktor med tryckbank	Förändring [%]
Grundscenario	2,73	-	3,38	-
Långvarig torka	2,87	+5,1	3,52	+4,3
Höjd grundvattennivå, skogsavverkning	2,60	-5,0	3,19	-5,8
Höjd grundvattennivå, skogsavverkning, översvämning	2,29	-19,3	2,76	-22,5

6.2.2 Stabilitetsanalys, odränerad analys

För den odränerade analysen presenteras ingen modell med torrskorpa eftersom skillnaden på säkerhetsfaktor mellan med och utan torrskorpa är under 1 % och anses därmed inte ha någon avsevärd betydelse för stabilitetsanalysen.

6.2.2.1 Analys av säkerhetsfaktor för bankområde

Samtliga säkerhetsfaktorer som erhållits av SLOPE/W för de fyra scenarier presenteras i tabell 6.6. Säkerhetsfaktorerna som erhållits för samtliga scenarier underkänns enligt Trafikverkets krav på säkerhetsfaktor för odränerad analys för konstruktioner i säkerhetsklass 3, $F \geq 1,65$. Resultaten av säkerhetsfaktorerna påvisar att långvarig torka (b) och översvämning intill bank (d) ger en försämring av bankens stabilitet på cirka 5 % oavsett om tryckbank används eller inte.

Enbart en grundvattenhöjning orsakad av skogsavverkning orsakar en stabilitetsförsämring på 1 %.

Tabell 6.6: Säkerhetsfaktor för bankområde. Presenteras med och utan tryckbank samt procentuell stabilitetsförändring mot grundscenario.

Scenario	Säkerhetsfaktor utan tryckbank	Förändring [%]	Säkerhetsfaktor med tryckbank	Förändring [%]
Grundscenario	1,36	-	1,32	-
Långvarig torka	1,29	-5,4	1,26	-5,3
Höjd grundvattennivå, skogsavverkning	1,35	-1,0	1,31	-0,9
Höjd grundvattennivå, skogsavverkning, översvämning	1,30	-4,7	1,26	-4,7

6.2.2.2 Analys av säkerhetsfaktor för enbart bank

Samtliga säkerhetsfaktorer som erhållits av SLOPE/W för de fyra scenarier presenteras i tabell 6.7. Säkerhetsfaktorerna som erhållits vid stabilitetsanalys av enbart järnvägsbanken godkänns med bra marginal för de krav Trafikverket har på säkerhetsfaktor för odränerad analys för konstruktioner i säkerhetsklass 3, $F \geq 1,65$. Till skillnad från stabilitetsanalysen på hela området påvisar säkerhetsfaktorn en förbättring av bankens stabilitet med tryckbank. Scenario (b) ökar bankens stabilitet med cirka 3 % både med och utan tryckbank. Vidare visar grundvattenhöjningarna i scenario (c) en försämring på cirka 5 % oavsett om tryckbank använts eller inte. Resultatet av scenario (d) konstaterar en betydande försämring med en stabilitetsförlust uppemot 16 % utan tryckbank och 17 % med tryckbank.

Tabell 6.7: Säkerhetsfaktor för enbart bank med och utan tryckbank med procentuell stabilitetsförändring mot grundscenario.

Scenario	Säkerhetsfaktor utan tryckbank	Förändring [%]	Säkerhetsfaktor med tryckbank	Förändring [%]
Grundscenario	2,85	-	3,39	-
Långvarig torka	2,95	+3,3	3,51	+3,4
Höjd grundvattennivå, skogsavverkning	2,71	-5,2	3,23	-5,2
Höjd grundvattennivå, skogsavverkning, översvämning	2,45	-16,4	2,91	-16,8

7

Diskussion

I följande kapitel kommer resultatet att diskuteras med avseende på hur skogsavverkning och extremväder påverkar vattenflöden och järnvägsbankens stabilitet.

7.1 Tolkning av resultat

7.1.1 Studien som ligger till grund för beräkningarna

Vid en jämförelse av de flöden som uppstår på platsen före och efter skogsavverkningen är det viktigt att förstå att en avrinningskoefficient på 0,67 i ett skogsbeklätt område är extremt högt. Denna avrinningskoefficient uppmättes i en vetenskaplig studie gjord i Österrike och uppmättes på en 50 m² stor försöksyta där mellan 40–50 % av ytan utgjordes av de kompakterade hjulspåren, där avrinningen i huvudsak skedde. Denna höga andel av kompakterade hjulspår på försöksytan beror på flera olika faktorer. Dels användes boggiband som ger bredare körspår och dels fanns ett specifikt syfte att studera inverkan på just ytavrinningen i och runt själva körspåren. Denna höga andel av körspår är inte representativ för en normal slutavverkning, men varierar beroende på hur man planerar körningen, områdets geometri och maskinistens erfarenhet. Det är svårt att säga exakt hur stor andel av en slutavverkad yta som generellt består av körspår. I ett normalfall där det är cirka 20 meter mellan stickvägarna utgör cirka 20 % av området kompakterade hjulspår (Skogskunskap, 2026). Hur stor andel av marken som består av körskador varierar dock kraftigt, eftersom det beror på hur man väljer att definiera körskadorna från maskinerna (Mohtashami m. fl., 2016). Examensarbetet har inte reducerat ner avrinningskoefficienten av ytan där avverkningen skett. Detta eftersom beräkningen ger ett konservativt värde på flödet som uppstår på det valda studieområdet utanför Lerum.

Marken i det studerade området i Österrike hade en lutning på 26 %, vilket motsvarar en lutning på cirka 15°. Hur denna lutningen påverkar koefficienten är inte klarlagt eller vidarestuderat i examensarbetet, men topografin är generellt en viktig faktor för hur vatten transporteras på markytan. Värt att nämna är att tester även gjordes i samma studie där maskiner inte användes alls. Där användes linbanedrift och manuell huggning. I det området lutade marken 32 %, trots

den branta lutningen uppmättes avrinningskoefficienten till 0,0 vid samma intensitet på 100 mm/h.

Anledningen till att koefficienten (0,67) blir väldigt hög i detta fall är för att marken pressats ihop av de stora maskinernas tyngd. Detta minskar markens porositet, vilket i sin tur leder till att infiltrationsförmågan och den hydrauliska konduktiviteten i marken sänks avsevärt. En annan del av att avrinningskoefficienten i detta fall blir väldigt hög är att marken samtidigt är fuktig, detta då avverkningen skedde under vintermånaderna med våta och ofrusna förhållanden.

Vidare använder sig studien av ett väldigt kraftigt regn (100 mm/h), där ett infiltrationsöverskott bildas. Detta innebär att marken blir så mättad att vattnet inte hinner tränga ner och rinner då istället på ytan. Detta innebär att skogsmarken fungerar mer som en hårdgjord yta än effektiv svamp som är scenariot i normala fall. Detta scenario blir då väldigt extremt och speglar ett värsta tänkbara scenario där ett 100-årsregn sker i kombination med en mark som packats av tunga skogsmaskiner cirka ett halvår innan studien påbörjades.

7.1.1.1 Jämförelse med vald studieplats

I jämförelse med den vetenskapliga studien gjord i Österrike har examensarbetet dimensionerat efter ett regn som motsvarar 54 mm/h. Detta genom den dimensioneringsprincip som används på Trafikverket där intensiteten beräknas och används för de dimensionerande regnet som i detta fall motsvarar en varaktighet på 60 minuter och har en återkomsttid på 100 år i Sverige.

Examensarbetet har inte reducerat ner avrinningskoefficienten för det avverkade området trots denna förändring (100 mm/h kontra 54 mm/h). Detta eftersom att koefficienten 0,67 ger ett väldigt väl tilltaget värde på flödet som beräknats på platsen och verkligen belyser skillnaden av markpackningen med de tunga avverkningsmaskinerna.

Även om en lägre intensitet på regnet teoretiskt skulle kunna ge en lägre koefficient belyser studien från Österrike fortfarande att naturlig mark med manuell huggning kan hantera en intensitet på regn upp till 100 mm/h utan någon avrinning. Detta innebär att det snarare är förändringen i markens struktur som är den kritiska faktorn, kontra intensiteten på regnet som faller.

En annan viktig del som skiljer studieområdet från den österrikiska studien är jordlagerföljden. På vår valda studieplats utanför Lerum antas det översta lagret ha mer inslag av sand för att sedan få ett mer lerigt segment under. Exakt hur jordlagerföljden ser ut på platsen är dock inte fastställt, detta då geoteknisk data för hela området var begränsad. En mer sandig profil infiltrerar vatten på ett bättre sätt men blir vid kraftiga koncentrerade regn snabbt vattenmättad på grund av lerans låga konduktivitet under, vilket leder till att infiltrationen blir begränsad och att ytavrinning istället uppstår (Grip Harald & Rodhe Allan, 2009). I den österrikiska studien valdes ett område med väldigt känslig mark redan innan studien påbörjades. Marken där består

till stor del av lera som har en hög biologisk aktivitet och en ovanligt hög konduktivitet. För den orörda leran i Österrike uppgick den hydrauliska konduktiviteten till 10^{-4} m/s (Behringer m. fl., 2025), vilket kan jämföras med de typiska värdena på runt 10^{-9} m/s för svensk lera som anges av SGU (2015). Den höga biologiska aktiviteten har dessutom lett till att jorden blivit mer uppsprucken och att den har gott om makroporer som underlättar transporten av vattnet. Dessa egenskaper gör att den österrikiska leran blir väldigt dränerande i orört tillstånd, men väldigt känslig och mottaglig för kompaktering och spårbildning vid hög fukthalt. Platser med mäktiga lerlager genom hela jordlagerprofilen återfinns dock på flera platser i Sverige, men kan skilja sig mot den som finns i Österrike.

Även om marktyperna skiljer sig åt är det principen som bygger på att tunga maskiner som kör på våt mark genererar skador och får effekter på vattenflödena i området. Att säga att marken vid en avverkning direkt får en koefficient på 0,67 är inte helt sanningsenligt, men det belyser vikten av att tunga maskiner under våta förhållanden ändrar markens förhållande fundamentalt.

7.1.1.2 Tolkning av resultatet från beräkningen vid Aspenområdet

Vid en jämförelse på vår valda studieplats före och efter avverkningen framgår det en ökning av flödet mellan cirka 200 – 480 % vid en 100-års händelse. Denna ökning av flödet innebär stor risk för erosions-, översvämnings-, bortspolnings- och stabilitetsskador likt de som nämns i kapitel 3.3.3. Det blir då avgörande med rätt dimensionerade avvattningssystem intill anläggningen för att minska de allvarliga konsekvenserna dessa effekter kan få. De två studerade områdena har 96 % respektive 54 % skogsbelagd mark. Denna höga andel skogsmark är en direkt bidragande faktor till att flödet ökar så pass mycket som det gör vid en avverkning. Vid en högre andel skogsbelagd mark ökar flödet i en högre grad, varvid konsekvenserna intill järnvägsanläggningen i form av dämning och erosionsrisk förväntas bli större och mer omfattande.

Det är också viktigt att understryka att skadorna som uppstår i marken blir kvar i flera år efter att avverkningen är genomförd. Enligt Croke m. fl. (1999) kunde skador som bildats i körspår ge avrinningskoefficienter på mellan 0,5–0,6 i upp till 5 år efter att avverkningen genomförts. Det innebär att den förhöjda risken för järnvägsanläggningen kvarstår i flera år efter att avverkningen skett och marken återhämtat sig naturligt.

Det förhöjda flödet tillsammans med att grundvattennivån stiger i området till följd av skogsavverkningen medför ökade risker för erosion och bortspolning. Hur dessa faktorer påverkar banvallens stabilitet diskuteras vidare i stabilitetsberäkningarna.

7.1.2 Metoden som grund till stabilitetsberäkningarna

En begränsning med den upprättade SLOPE/W modellen är att den utgör en tvådimensionell förenkling av en tredimensionell verklighet. Som nämnts i kapitel 2.3.1 medföljer en viss osä-

kerhet och åtskillnad från verkligheten när stabiliteten analyseras i ett datorprogram. Denna åtskillnad bör beaktas och stabiliteten i de genomförda analyserna kan skilja sig från verkliga scenarier. Däremot är SLOPE/W ett väletablerat geotekniskt program och används som branschstandard över hela världen. Programmets stabilitetsanalysberäkningar antas därmed uppfylla syftet att kunna analysera järnvägsbankens stabilitet utifrån de olika scenarier för att ge en förståelse om hur stabil banken är utifrån olika förutsättningar.

Modellens utformning som i sin grund baserades på höjdpunktsdata från platsstudien i kapitel 4.1.1 gav en bra och verklig uppfattning hur ett område som anses vara en riskpunkt är uppbyggd. Den data som användes i programmet QGIS varierar dock i noggrannhet. Mätintervallen för datan varierade mellan 1–50 meter. I en verklig platsundersökning hade mätdata med för stora intervall påverkat resultatets tillförlitlighet och avvikit från verkligheten. I samband med skapandet av typmodellen frångår rapportens resultat vikten av en noggrann geoteknisk mark- och områdesundersökning, och ansätter istället mer typiska värden och jordlagerföljder.

Typmodellen, som baserades på en mer generell lagerföljd, höjdpunkts- och parameterdata, gör det möjligt att skapa en modell vars tillämpbarhet når en bredare utsträckning i Sverige. Samtidigt gör förenklingen möjligt att enkelt isolera parametrar för att utföra känslighetsanalyser och se exakt vad som påverkar stabiliteten. Vidare är typmodellen ett effektivt sätt att lyfta fram principiella beteenden för järnvägsbanken i liknande riskpunktsområden.

7.1.3 Resultatet av stabilitetsanalysberäkningarna

Resultatet av stabilitetsanalysberäkningarna genomfördes med en kombinerad och odränerad analys på området omkring järnvägsbanken och själva järnvägsbanken i sig. För detta testades 4 scenarier med och utan torrskorpa samt med och utan tryckbank. Totalt genomfördes därmed 48 stycken stabilitetsanalyser där säkerhetsfaktorn studerades och antecknades i tabeller.

I denna rapport analyserades säkerhetsfaktorn enligt säkerhetsmetoden från avsnitt 3.1.3.6. Totalsäkerhetsmetoden lämpar sig bra när det gäller att tillståndsbedöma äldre konstruktioner, i detta fallet en redan existerande järnvägsbank. Idag används främst partialkoefficientmetoden (3.1.3.5) för nya konstruktioner i enlighet med Eurocode för att ge en mer nyanserad hantering av osäkerheterna.

I denna stabilitetsanalys användes totalsäkerhetsmetoden eftersom nödvändiga säkerhetsmarginaler och specifika parametrar inte behöver tas hänsyn till. Vidare räcker det enbart att studera den sammanslagna säkerhetsfaktorn vid användning av totalsäkerhetsmetoden, vilket ger ett enkelt och trovärdigt resultat. Efter en noggrann granskning av resultaten presenteras nedan de huvudsakliga slutsatserna kring säkerhetsfaktorerna och vad som inverkar på bankens stabilitet med hänvisning till trafikverkets krav på säkerhetsfaktor enligt avsnitt 3.1.3.3.

7.1.4 Tolkning av resultatet från stabilitetsanalysberäkningarna

Stabiliteten i intilliggande område: Säkerhetsfaktorn för hela området framstår som något problematisk. Stabilitetsanalysberäkningarna gav att säkerhetsfaktorn för samtliga simuleringar varierar mellan 1,21 och 1,36. En säkerhetsfaktor under 1,65 uppfyller inte Trafikverkets krav på stabilitet. Eftersom delar av utredningsområdet inte uppfyller kravet för säkerhetsfaktor 1,65 krävs stabilitetshöjande åtgärder för typmodellen.

Anledningen till att stabilitetsanalysberäkningarna resulterar i låga och kritiska värden är på grund av den skredbenägna topografin. Stora tyngder från järnvägsbanken ligger placerade tätt intill en slänt som mynnar ner i en sjö. De pådrivande krafterna i slänten närmar sig materialets maximala skjuvhållfasthet, vilket innebär att tillståndet för gränsjämvikt nästan har uppnåtts och risken för skred är betydande, se avsnitt 3.1.3.4.

Vidare beskriver detta varför säkerhetsfaktorn påverkas negativt för intilliggande område när tryckbanken appliceras i simulationen. Enligt avsnitt 3.1.3.4 påverkar den tillförda lasten släntens förmåga att motstå skjuvning och risken att nå brottgränstillstånd ökar. Detta förklarar varför en stabiliserande åtgärd för järnvägsbanken kan ha negativa konsekvenser för stabiliteten för området intill banken.

Stabiliteten för järnvägsbanken: Vid stabilitetsanalys av enbart järnvägsbanken erhöles höga säkerhetsfaktorer för samtliga simuleringsfall. De beräknade värdena som varierade mellan 2,29 och 3,52 indikerar omfattande marginal mot brott och en därmed låg skredrisk. Dessa resultat överstiger med god marginal de minimikrav som Trafikverket ställer på geotekniska konstruktioner.

Trots den höga säkerhetsnivån bör resultaten tolkas med försiktighet ur ett optimeringsperspektiv. En betydande överdimensionering av en järnvägsbank medför negativa konsekvenser i form av oskäligen anläggningskostnader och en ökad klimatbelastning. Det är därför osannolikt att befintliga järnvägsbankar i motsvarande miljöer uppvisar den grad av stabilitet som typmodellen i SLOPE/W indikerar.

I kontrast till stabilitetsförhållandena i det intilliggande området bidrar den analyserade tryckbanken till en mätbar höjning av säkerhetsfaktorn. Detta resultat bekräftar tryckbankens avsedda funktion som en stabiliserande åtgärd längs järnvägskonstruktionen.

Torrskorpan: Ett tydligt samband som upptäcktes när säkerhetsfaktorn studerades var att torrskorpan inte hade någon påverkan på säkerhetsfaktorn. En marginell skillnad på upp till 1 % uppstod vid simuleringarna och antas vara så liten att ingen betydande stabilitetsförsämring kan kopplas till torrskorpan. Av anledning att den kritiska glidyten enbart passerar torrskorpan i ringa mängd jämfört med hela glidyten påverkar torrskorpan den hela beräkningen marginellt.

Scenario b: Resultaten från stabilitetsanalysen i SLOPE/W påvisar att scenariot med långvarig torka visar en intressant skillnad mellan områdesanalysen och bankanalysen. För hela bankområdet (tabell 6.2) minskar säkerhetsfaktorn med drygt 5–6 %. Denna försämring av stabilitet beror på att marken som hamnar ovanför den nya lägre grundvattennivån förlorar sin upptryckande flytkraft.

För enbart banken uppstår dock den motsatta effekten, här ökar i stället säkerhetsfaktorn med 5–6 %. Detta beror på att en lägre grundvattennivå minskar portrycket i bankmaterialet. Det ökar effektivspänningen och därmed skjuvhållfastheten, vilket förbättrar den lokala stabiliteten.

Ur ett klimatperspektiv innebär klimatförändringen inte enbart en ökad mängd nederbörd utan även extremtorka under perioder. Som resultaten visar kan även extrem torka leda till en försämrad stabilitet och därmed även en ökad risk för skred.

Scenario c: I detta scenario observerades att totalstabiliteten för hela bankområdet förblir opåverkad, med en marginell minskning av säkerhetsfaktorn på endast 1 %. Detta förklaras genom att de kritiska glidytorerna i SLOPE/W räknar ut befinner sig under den höjda grundvattennivå och därmed inte påverkas nämnvärt av denna nivåhöjning.

Tittar man däremot på den lokala stabiliteten för enbart järnvägsbanken, är effekten mer påtaglig. Här sjunker säkerhetsmarginalen betydligt mer. Skogsavverkningen (från kapitel 3.5.3) leder till kraftig minskning av interception och att trädens transpiration försvinner. Vidare driver detta upp grundvattennivån i marken. När vattennivån stiger inuti själva bankroppen byggs portvattentrycket upp. Detta fenomen sänker effektivspänningarna i friktionsmaterialet vilket direkt reducerar förmågan att stå emot skjuvkrafter och resulterar i en försämrad bärighet, se avsnitt 3.2.

Scenario d: Kombinationen av de olika simulerade scenarier i scenario (d) representerar studiens minst gynnsamma resultat från ett geotekniskt perspektiv. För hela bankområdet sker ingen signifikant förändring jämfört med större delar av de andra försämringarna vilket kan tyda på att programmet inte tar någon större hänsyn till översvämningens påverkan på järnvägsbanken.

Den mest kritiska konsekvensen syns när resultatet avgränsas till enbart banken. Här rasar säkerhetsfaktorn med upp till hela 23 %. Vid en översvämning blir bankmaterialet till stor del mättat, alternativt fullständigt mättat. Detta medför ett förhöjt portryck inuti banken, vilket resulterar i att effektivspänningen sjunker. Som en direkt följd av den reducerade effektivspänningen minskar även bankmaterialets friktion mellan stenarna. Parallelt med denna försämring av stabiliteten utsätts banken dessutom av ett vattenflöde genom banken, likt de som beskrivs i kapitel 3.2.2.

7.1.5 Jämförelse mellan odränerad-och kombinerad analys

I samtliga utförda stabilitetsanalysberäkningarna resulterar den odränerade analysen en högre säkerhetsfaktor. Skillnaden i jämförelse av säkerhetsfaktorernas värde antas inte vara anmärkningsvärt stora. För att avgöra vilken analys som blir styrande är det viktigt att göra en bedömning av tänkbara skredförlopp. Den odränerade skjuvhållfastheten är normalt avgörande för normalkonsoliderade och svagt överkonsoliderade (homogena) leror ($OCR < 1,5$) (Lindvall & Jönsson, 2023). I överkonsoliderade leror där skikt och lager av grövre jordar återfinns får främst den dränerade skjuvhållfastheten betydelse. Vid val av kombinerad analys ska förutsättningarna för ett partiellt dränerat brott ha klarlagts. Vidare ska kombinerad analys vara styrande i områden med lägre effektivspänning. För denna rapport har nödvändig kunskap om vilken analys som blir avgörande för dimensionering inte gjorts utan det är säkerhetsfaktorernas förändring på grund av olika simulerade scenarier som undersökts.

8

Slutsats

8.1 Slutsats

Sammanfattningsvis visar denna studie att slutavverkningen av skog får flera konsekvenser på de hydrologiska mönstret, vilket i sin tur påverkar järnvägsanläggningen. Flödesökningen till följd markkompakteringen kan få stora konsekvenser vid ett extremscenario, och studien visar att andelen skogsbeklädd mark som avverkas har stor inverkan på hur stor ytavrinningen som uppstår. Vid exempelvis område A (96 % skogsbeklädd mark) blir flödet betydligt högre ner mot banken än vid område B (54 % skogsbeklädd mark), detta enligt tabell 6.1. Vidare kan slutsatser gällande avverkningsmetod dras från examensarbetet. Genom ett val av avverkningsmetod med lättare maskiner alternativt manuell huggning minskas markpackningen. Detta leder till en lägre avrinningskoefficient vilket resulterar till en lägre ytavrinning i området.

En annan viktig slutsats är att hyggesfritt skogsbruk ger bättre förutsättningar för att skydda infrastrukturen. Detta eftersom mer vegetation lämnas kvar på platsen, vilket minskar körskadorna samtidigt som den naturliga interceptionen och evapotranspirationen bibehålls i en högre grad. Detta leder vidare till att vegetationen motverkar den höjning av grundvattennivåerna som kalavverkning annars orsakar, vilket minskar riskerna för järnvägsanläggningens stabilitet.

Gällande förändrade grundvattennivåers påverkan på järnvägsbankens stabilitet visar studien på blandade resultat. För hela bankområdet framstod både en höjning och en sänkning av grundvattennivåer som en försämrande faktor för stabiliteten. En grundvattenhöjning har en knappt marginell försämring på järnvägsbankens stabilitet, medan en grundvattensänkning och vattennivåsänkning i sjön resulterar till en större försämring av stabiliteten. När stabiliteten för enbart banken undersöktes visade resultaten att både en förbättring och försämring kunde uppstå. En sänkning av grundvattennivån gav en stabiliserande effekt där stabiliteten inuti banken ökade medan en höjning av grundvattennivå påvisade en försämrad stabilitet.

Klimatförändringarna förväntas intensifiera extremväder. I ett framtida scenario där en kombination av intensivt regn och förändrade hydrologiska faktorer orsakade av skogsavverkning

intill järnvägen, skulle det kunna uppstå ett kraftigt flöde och översvämning mot banken. Huruvida faktorer som översvämning och kraftigt vattenflöde genom banken kommer att orsaka ras eller bortspolning är svårt att fastställa. Faktumet att ras och bortspolning av järnvägsbankar sker är inget nytt fenomen. Det kan man exempelvis se från tågurspårningarna i Skorped och på Ostkustbanan (se figur 3.3). Många av de tidigare urspårningarna som skett på grund av bortspolning eller ras kopplas även till andra faktorer såsom förändrade vattenflödesvägar eller underhållsbrist på avvattningsanläggningen. Hjulströms diagram (se sida xii) ger en uppfattning om vilken flödes hastighet genom banken som behövs för att bortspolning av bank ska ske. Dessvärre har ingen uppskattning av flödes hastigheter gjorts i examensarbetet. I ett extremscenario där trummorna blir igentäppta och ett maxflöde (exempelvis enligt tabell 6.1) leder till översvämning och eventuell materialtransport från avrinningsområdet, kan det antas att en risk för bankbortspolning eller ras kan uppstå (kapitel 3.3). Detta kan i sin tur leda till omfattande samhällsekonomiska konsekvenser och höga återställandekostnader.

8.2 Rekommendationer och vidare forskning

Baserat på studiens resultat rekommenderas samplanering mellan Trafikverket och skogsägare vid stora avverkningar intill järnvägsanläggningar. I tillståndsprocessen för skogsavverkning i mer kritiska riskzoner som detta examensarbete behandlar bör en geoteknisk riskbedömning göras för att undersöka hur skogsavverkningen i kombination av ett extremregn kan påverka järnvägsbankars stabilitet.

För framtida studier kan klimatfaktorerna som används vid dimensionering av järnvägsanläggningen vidare studeras. Detta eftersom det kan framstå problematiskt att klimatfaktorerna och värsta scenarier vid dimensionering av anläggningen idag enbart tar hänsyn till vad som sker till år 2100, samtidigt som ny infrastruktur ofta dimensioneras för en teknisk livslängd på 120 år. Detta innebär att det med dagens dimensioneringsprinciper fattas 50 år av klimatförändring som inte tas hänsyn till vid utformning av kritisk infrastruktur.

Källförteckning

- Banverket. (2003 november). *Trummor och ledningar* (tekn. rapport). Borlänge.
- Behringer, M., Grünberg, J., Katzensteiner, K., Kitzler, B., Kohl, B., Lechner, V., Malli, A., Markart, G., Meißl, G., & Scheidl, C. (2025). Comparison of the effect of winch-assisted timber harvesting systems and cable yarding on soil water retention and surface runoff in a temperate deciduous forest. *Journal of Hydrology*, 658, 133183. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2025.133183>
- Bondelid Mia & Häggström Steffen. (2018 januari). *Hydraulik för samhällsbyggare* (Andra upplagan). Liber AB.
- Cordulus. (2025 september). Vad är evapotranspiration? <https://www.cordulus.com/sv/glossary/evapotranspiration>
- Coumou, D., & Rahmstorf, S. (2012 juli). A decade of weather extremes. <https://doi.org/10.1038/nclimate1452>
- Croke, J., Hairsine, P., & Fogarty, P. (1999). Runoff generation and re-distribution in logged eucalyptus forests, south-eastern Australia. *Journal of Hydrology*, 216(1-2), 56–77. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00288-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00288-1)
- de Abreu, V. H. S., Santos, A. S., & Monteiro, T. G. M. (2022). Climate Change Impacts on the Road Transport Infrastructure: A Systematic Review on Adaptation Measures. *Sustainability (Switzerland)*, 14(14). <https://doi.org/10.3390/SU14148864>
- Dehlbom, B., Rankka, W., Rudebeck, D., Vesterberg, B., & Dagli, D. (2021). Stabilitetsberäkning av befintliga järnvägsbankar.
- Granhage Leif. (2009 oktober). *KOMPENDIUM I VÄGBYGGNAD* (tekn. rapport). Institutionen för bygg- och miljöteknik. Chalmers tekniska högskola. Göteborg. www.chalmers.se,
- Grip Harald & Rodhe Allan. (2009). *Vattnets väg från regn till bäck* (tekn. rapport). Institutionen för Geovetenskaper, Uppsala universitet. Karlshamn. <https://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1047230/FULLTEXT01.pdf>
- Guillemette, F., Plamondon, A. P., Prévost, M., & Lévesque, D. (2005). Rainfall generated stormflow response to clearcutting a boreal forest: Peak flow comparison with 50 world-wide basin studies. *Journal of Hydrology*, 302(1-4), 137–153. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.06.043>

- IEG. (2010). Implementeringskommission för Europastandarder inom Geoteknik. www.ieg.nu
- Inokoshi, S., Gomi, T., Chiu, C. W., Onda, Y., Hashimoto, A., Zhang, Y., & Saitoh, T. M. (2023). A watershed-scale evapotranspiration model considering forest type, stand parameters, and climate factors. *Forest Ecology and Management*, 547, 121387. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2023.121387>
- Järnvägmuseet. (2024 oktober). Tidslinje Järnvägens historia. <https://www.jarnvagsmuseet.se/utforska/tidslinje#/1856---jarnvagen-invigs>
- Larsson, R., Sällfors, G., Bengtsson, P.-E., Alén, C., Bergdahl, U., & Eriksson, L. (2007). Skjuvhållfasthet - utvärdering i kohesionsjord.
- Lee, H., & Romero, J. (2023). Climate Change 2023 Synthesis Report, 35–115. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Lerums kommun. (2026). Detaljplan för Aspen strand.
- Li, D., Wang, J., Wang, Y., & Liu, X. (2026). Quantifying groundwater level variability and annual slope failure probability using multi-year groundwater level observations. *Engineering Geology*, 363. <https://doi.org/10.1016/J.ENGGEOL.2026.108584>
- Lindvall, R., & Jönsson, Å. (2023). Metodik för sannolikhetsberäkningar.
- Lundh, J.-E. (2015). BVS 1516 - Trädfällningsmetoder vid trädsäkring av järnväg (2014:0781). *BVDOK*, 1(17).
- Lundin, L. (1979). *Kalhuggningens inverkan på markvattenhalt och grundvattennivå* (tekn. rapport). SLU, Rapporter i skogsekologi och skoglig marklära 36.
- Mats Hannerz, F. : Berglund, M., Deutgen, A., Hjelm, K., Lariviere, D., Lula, M., Olofsson, E., Romans, E., & Sverges lantbruksuniversitet. (2025). *Kopiera, modifiera eller ignorera? - lärdomar från europeisk skogsskötsel* (tekn. rapport). Umeå. <https://doi.org/10.54612/a.7igt3m4kot>
- Mohtashami, S., Nordlund, S., Krook, M., Bergkvist, I., Ring, E., & Högbom, L. (2016). Körskadorna vid slutavverkning—En inventeringsstudie i Mälardalen.
- Naturskyddsföreningen. (2021 mars). Vad är klimatförändringar? - Naturskyddsföreningen. <https://www.naturskyddsforeningen.se/faktablad/vad-ar-klimatforandringar/>
- Naturvårdsverket. (2026 februari). Dagvatten och skyfall.
- Olsson, J., Berg, P., Eronn, A., Simonsson, L., Södling, J., Wern, L., & Yang, W. (2017a). *Extremregn i nuvarande och framtida klimat* (tekn. rapport).
- Olsson, J., Berg, P., Eronn, A., Simonsson, L., Södling, J., Wern, L., & Yang, W. (2017b). *Extremregn i nuvarande och framtida klimat Analyser av observationer och framtids-scenarier* (tekn. rapport).
- OpenStreetMap. (2026 maj). OpenStreetMap. <https://www.openstreetmap.org/#map=5/62.99/17.64>
- Partille Energi. (2026 juni). Vägarbeten och vattennivån i Aspen – Partille Energi. <https://partilleenergi.se/2025/06/23/normal-sommarniva-i-aspen-fran-1-juli/>

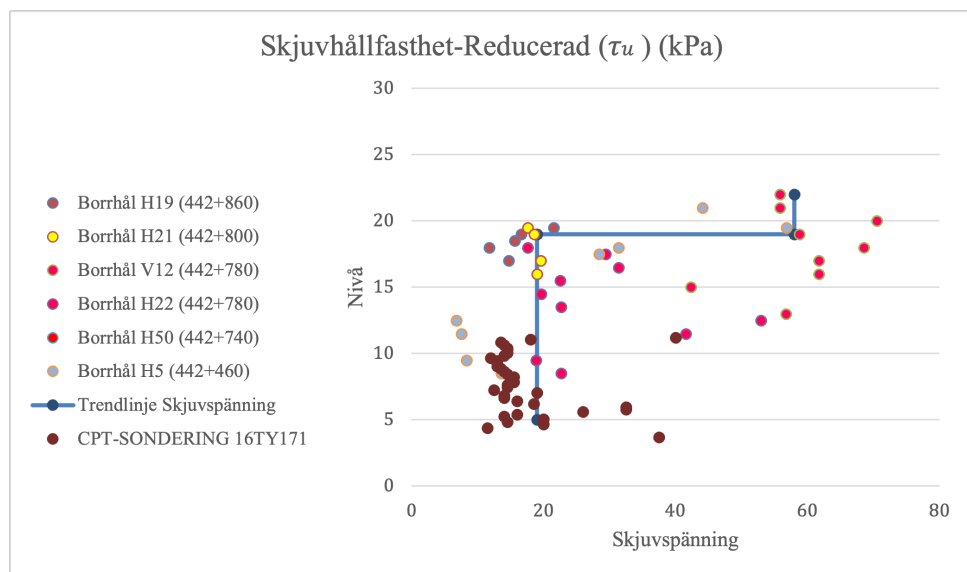
- Populär Historia. (2006 augusti). Sveriges järnvägars historia. <https://populärhistoria.se/teknik/trafik/150-ar-pa-rals>
- Puntenney-Desmond, K. C., Bladon, K. D., & Silins, U. (2020). Runoff and sediment production from harvested hillslopes and the riparian area during high intensity rainfall events. *Journal of Hydrology*, 582, 124452. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2019.124452>
- QGIS Foundation. (2026). QGIS Foundation. (Version 3.40.15). QGIS Desktop.
- Seequent. (2026). GeoStudio (Version 2025.2.1) [SLOPE/W].
- SGI. (2023 juni). *Utredning av släntstabilitet* (tekn. rapport). Linköping.
- SGI & MSB. (2021). *Riskområden för ras, skred, erosion och översvämning* (tekn. rapport). Linköping.
- SGU. (2015). Tätande jordlager.
- Skogskunskap. (2025 juni). Om slutavverkning. <https://www.skogskunskap.se/skota-skog/slutavverka/slutavverkningens-grunder/>
- Skogskunskap. (2026). Stickvägsareal. <https://www.skogskunskap.se/ordlista/s/stickvagsareal/>
- Skogsstyrelsen. (u. å-a). Avverkningsstatistik. <https://www.skogsstyrelsen.se/statistik/avverkning/avverkningsstatistik/>
- Skogsstyrelsen. (u. å-b). Bruttoavverkad volym (milj. m³sk) efter region. År 2022-2024. https://pxweb.skogsstyrelsen.se/pxweb/sv/Skogsstyrelsens%20statistikdatabas/Skogsstyrelsens%20statistikdatabas__Avverkning/JO0312_02a.px/table/tableViewLayout2/
- Skogsstyrelsen. (u. å-c). Sysselsättningsstatistik i skogsbruket. <https://www.skogsstyrelsen.se/statistik/arbetskraft/sysselsattning-i-skogsbruket/>
- Skogsstyrelsen, Lars Lundqvist, Ola Lindroos, Göran Hallsby & Clas Fries. (2014). Skogsskötserien - Slutavverkning. www.skogsstyrelsen.se/skogsskotselserien
- SMHI. (u. å-a). Avdunstning. <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/hydrologi/vattenbalans-och-vattnets-kretslopp/avdunstning>
- SMHI. (u. å-b). Grundvatten. <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/hydrologi/vattenbalans-och-vattnets-kretslopp/grundvatten>
- SMHI. (u. å-c). Markvatten. <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/hydrologi/vattenbalans-och-vattnets-kretslopp/markvatten>
- SMHI. (u. å-d). RCP scenarier. <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/klimat/klimatmodeller-och-scenarier/rcp-scenarier>
- SMHI. (2024 juli). Vägar och järnvägar. <https://klimatanpassning.se/anpassning-till-ett-forandrat-klimat/paverkan-pa-samhället---och-samhällets-anpassning/transport/vagar-och-jarnvagar>
- SMHI & Bergström Sten. (2014 december). *SVERIGES HYDROLOGI-grundläggande hydrologiska förhållanden* (tekn. rapport). Norrköping. <https://www.smhi.se/publikationer-fran-smhi/sok-publikationer/2014-12-03-sveriges-hydrologi>

- Sojka, M., Stasik, R., & Korytowski, M. (2020). Assessment of the impact of clear-cutting on groundwater regime in swampy habitats. *Baltic Forestry*, 26(2), 1–8. <https://doi.org/10.46490/BF151>
- Statens Geotekniska Institut. (2025 december). Erosion. <https://www.sgi.se/vara-expertomraden/skred-ras-och-erosion/erosion>
- Statens haverikommission. (2024). *SHK årsrapport Spårtrafik 2024 (2024:14)* (tekn. rapport).
- Statistiska centralbyrån. (2023 juni). Marken i Sverige. <https://www.scb.se/hitta-statistik/sverige-i-siffror/miljo/marken-i-sverige/>
- Svenskt vatten. (2016 januari). *Avledning av dag-, drän-och spillvatten* (tekn. rapport).
- Sveriges geologiska undersökning. (2025 februari). Ordlista Vattenförvaltning av grundvatten. <https://www.sgu.se/anvandarstod-for-geologiska-fragor/vattenforvaltning-av-grundvatten/om-vagledning-vattenforvaltning-av-grundvatten/ordlista/>
- Sveriges Skogsvårdsförbund. (2000). Hydrologi. <https://www.skogen.se/glossary/hydrologi/>
- Sveriges skogsvårdsförbund & Michael Håkansson. (2000). interception - Skogen. <https://www.skogen.se/glossary/interception/>
- Sällfors Göran. (2023). *Geoteknik*. CREMONA.
- Thorén, T., Isacson, U., Drohic, A., & Gustafsson, J. (2020 december). *Vägledning för erosionsutredning i vattendrag* (tekn. rapport). SGI. Linköping.
- Trafikverket. (2015a mars). *BVS 1585.005 - Typsektioner för banan* (tekn. rapport).
- Trafikverket. (2015b maj). *BVS 1585.002 - Stabilitet för befintliga järnvägar (2015:0154)* (tekn. rapport).
- Trafikverket. (2017 september). *Trafikverkets tekniska krav för avvattning-TK Avvattning (2014:0045)* (tekn. rapport). Trafikverket.
- Trafikverket. (2018 september). *Regeringsuppdrag om Trafikverkets klimatanpassningsarbete (2018:195)* (tekn. rapport).
- Trafikverket. (2019 september). *Trafikverkets klimat- och sårbarhetsanalys 2019 (2020:076)* (tekn. rapport). Borlänge.
- Trafikverket. (2020a februari). Tjälskador på järnvägen - Bransch. <https://bransch.trafikverket.se/for-dig-i-branschen/jarnvag/arstidstyrda-vaderberedskapsplaner-jarnvag/vaderberedskapsplan-var---jarnvag/tjalskador-pa-jarnvagen/>
- Trafikverket. (2020b). Banöverbyggnad Makadamballast (TRVINFRA-00019).
- Trafikverket. (2024 november). *Avvattning - Dimensionering och utformning (TRVINFRA-00231)* (tekn. rapport). Borlänge.
- Trafikverket. (2025a maj). *Geokonstruktion, Dimensionering och utformning (TRVINFRA-00230)* (tekn. rapport). Borlänge.
- Trafikverket. (2025b juni). Om järnvägens dåtid, nutid och framtid. <https://www.trafikverket.se/resa-och-trafik/jarnvag/jarnkoll--fakta-om-svensk-jarnvag/om-jarnvagens-datid-nutid-och-framtid/>

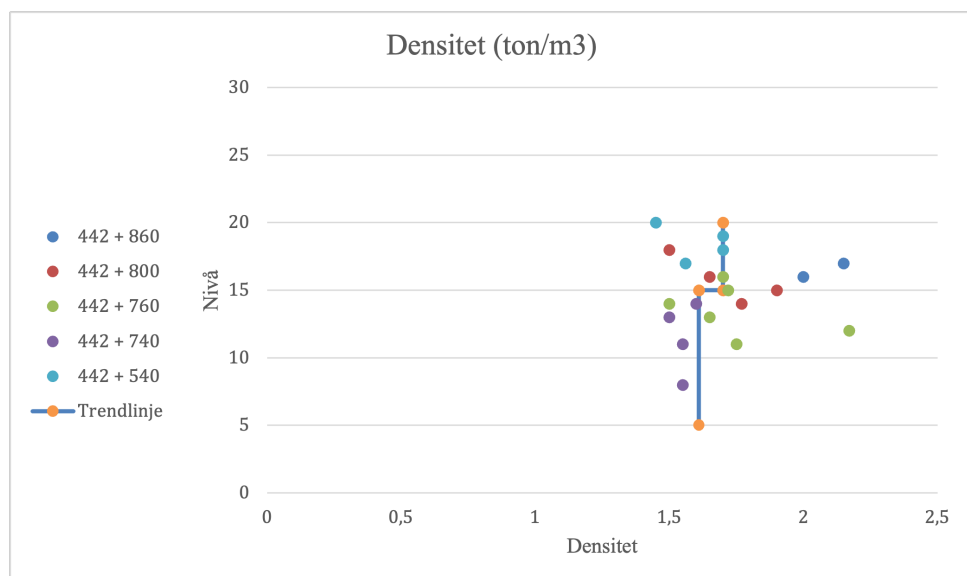
- Trafikverket. (2026 februari). Västra stambanan, Göteborg Alingsås. <https://www.trafikverket.se/vara-projekt/projekt-i-vastra-gotalands-lan/vastra-stambanan-goteborgalingsas/>
- Törngren, R. (2014). Omslagsbild av tågurspårning.
- Ögren, P. (2021 januari). *Stabilitetshöjande åtgärd för Ådalsbanan, bandel 232 vid Korvsta* (tekn. rapport).

A

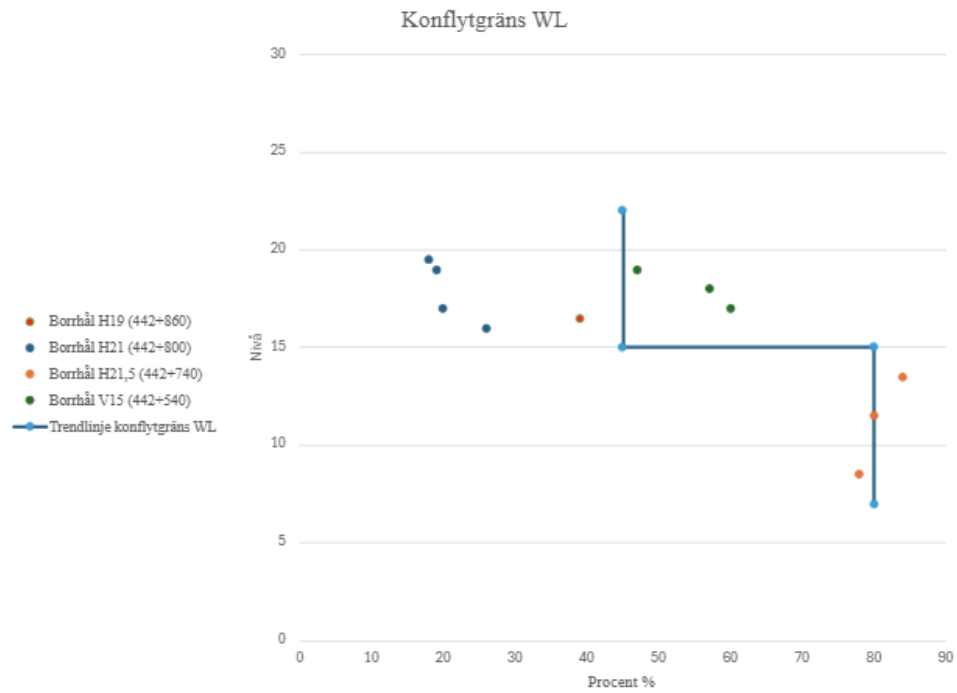
Appendix A



Figur A.1: Skjuvhållfasthet mot nivå samt trendlinje



Figur A.2: Densitet mot nivå samt trendlinje



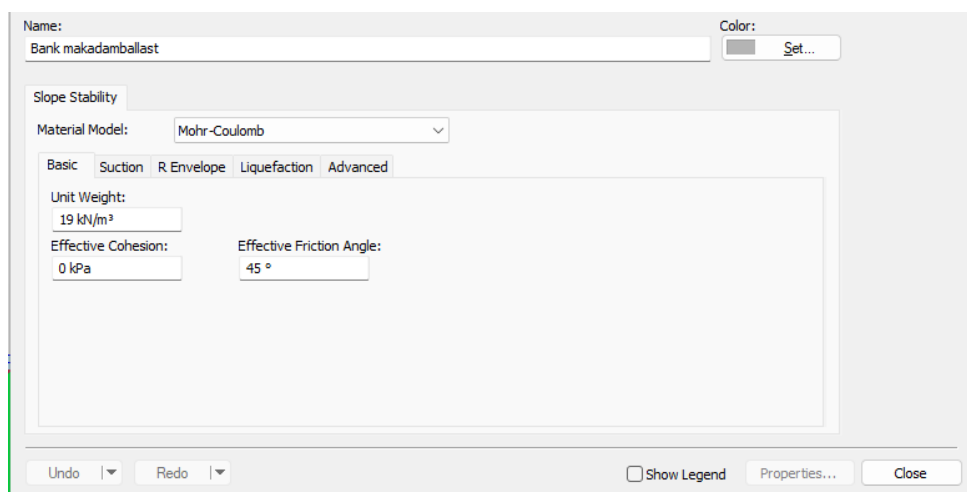
Figur A.3: Konflytgräns mot nivå samt trendlinje

B

Appendix B



Figur B.1: Jordlagerföljd för typmodellen med varierande lagerdjup genom modellen



Figur B.2: Parametervärde för bank ballast

The screenshot shows the 'Slope Stability' dialog box for a material named 'Lera'. The 'Material Model' is set to 'Combined, S=f(depth)'. The 'Basic' tab is active, showing the following parameters:

- Unit Weight: 18 kN/m³
- Drained Strengths:
 - Cohesion - Top of Layer: 3 kPa
 - Cohesion - Rate of Change: 0 (kN/m²)/m
 - Friction Angle: 30 °
- Undrained Strengths:
 - Su - Top of Layer: 30 kPa
 - Su - Rate of Change: 1 (kN/m²)/m
 - c'/Su Ratio: 0.1

At the bottom, there are buttons for 'Undo', 'Redo', 'Show Legend', 'Properties...', and 'Close'.

Figur B.3: Parametervärde för kombinerad analys av lera

The screenshot shows the 'Slope Stability' dialog box for a material named 'Lera'. The 'Material Model' is set to 'S=f(depth)'. The 'Basic' tab is active, showing the following parameters:

- Unit Weight: 18 kN/m³
- Undrained Shear Strength (Su):
 - Top of Layer: 30 kPa
 - Rate of Change: 1 (kN/m²)/m
 - Maximum value: 100 kPa

At the bottom, there are buttons for 'Undo', 'Redo', 'Show Legend', 'Properties...', and 'Close'.

Figur B.4: Parametervärde för odränerad analys av lera

The screenshot shows the 'Slope Stability' dialog box for a material named 'Sandig morän'. The 'Material Model' is set to 'Mohr-Coulomb'. The 'Basic' tab is active, showing the following parameters:

- Unit Weight: 20 kN/m³
- Effective Cohesion: 0 kPa
- Effective Friction Angle: 35 °

At the bottom, there are buttons for 'Undo', 'Redo', 'Show Legend', 'Properties...', and 'Close'.

Figur B.5: Parametervärde för sandig morän

Name: Torrskorpa lera Color: Set...

Slope Stability

Material Model: S=f(depth)

Basic Advanced

Unit Weight: 18 kN/m³

Undrained Shear Strength (Su)

Top of Layer: 45 kPa Rate of Change: 0 (kN/m²)/m Maximum value: 100 kPa

Undo | Redo | ☐ Show Legend Properties... Close

Figur B.6: Parametervärde för odränerad analys av torrskorpan

Name: Torrskorpa lera Color: Set...

Slope Stability

Material Model: Combined, S=f(depth)

Basic Advanced

Unit Weight: 18 kN/m³

Drained Strengths

Cohesion - Top of Layer: 4.5 kPa Cohesion - Rate of Change: 0 (kN/m²)/m Friction Angle: 30 °

Undrained Strengths

Su - Top of Layer: 45 kPa Su - Rate of Change: 0 (kN/m²)/m c'/Su Ratio: 0.1

Undo | Redo | ☐ Show Legend Properties... Close

Figur B.7: Parametervärde för kombinerad analys av lera

Name: Tryckbank Color: Set...

Slope Stability

Material Model: Mohr-Coulomb

Basic Suction R Envelope Liquefaction Advanced

Unit Weight: 18 kN/m³

Effective Cohesion: 0 kPa Effective Friction Angle: 38 °

Undo | Redo | ☐ Show Legend Properties... Close

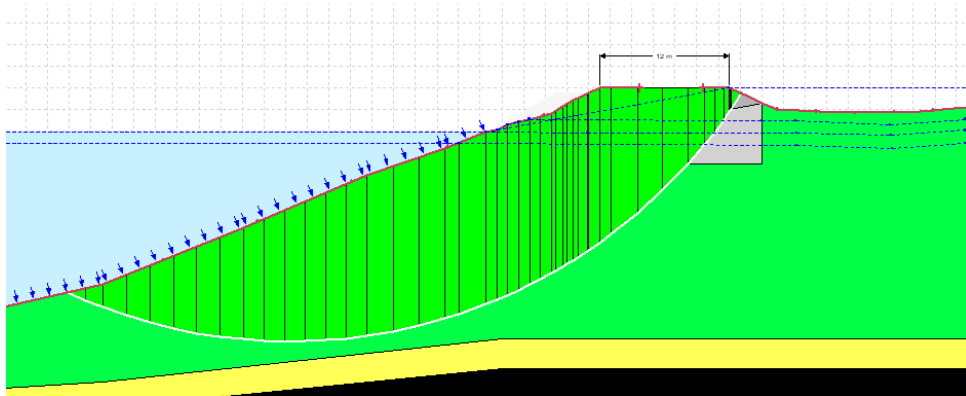
Figur B.8: Parametervärde för tryckbank

The screenshot shows a software window titled 'Slope Stability'. At the top, there is a 'Name:' field containing 'Ugrävning Grovkrossad-sprängsten' and a 'Color:' field with a grey swatch and a 'Set...' button. Below this is a 'Material Model:' dropdown menu set to 'Mohr-Coulomb'. Underneath are five tabs: 'Basic', 'Suction', 'R Envelope', 'Liquefaction', and 'Advanced'. The 'Basic' tab is active, showing 'Unit Weight:' as '20 kN/m³', 'Effective Cohesion:' as '0 kPa', and 'Effective Friction Angle:' as '45 °'. At the bottom of the window are 'Undo' and 'Redo' buttons with dropdown arrows, a 'Show Legend' checkbox, a 'Properties...' button, and a 'Close' button.

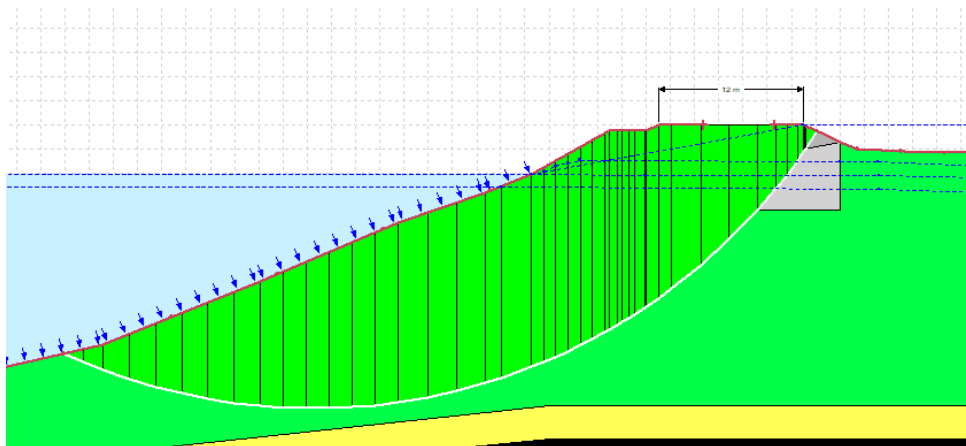
Figur B.9: Parametervärde för grovkrossad sprängsten

C

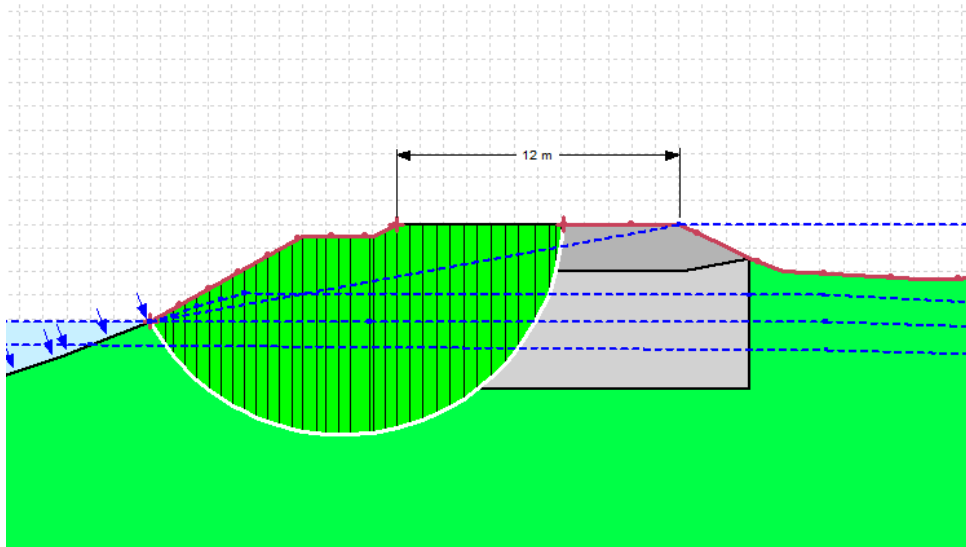
Appendix C



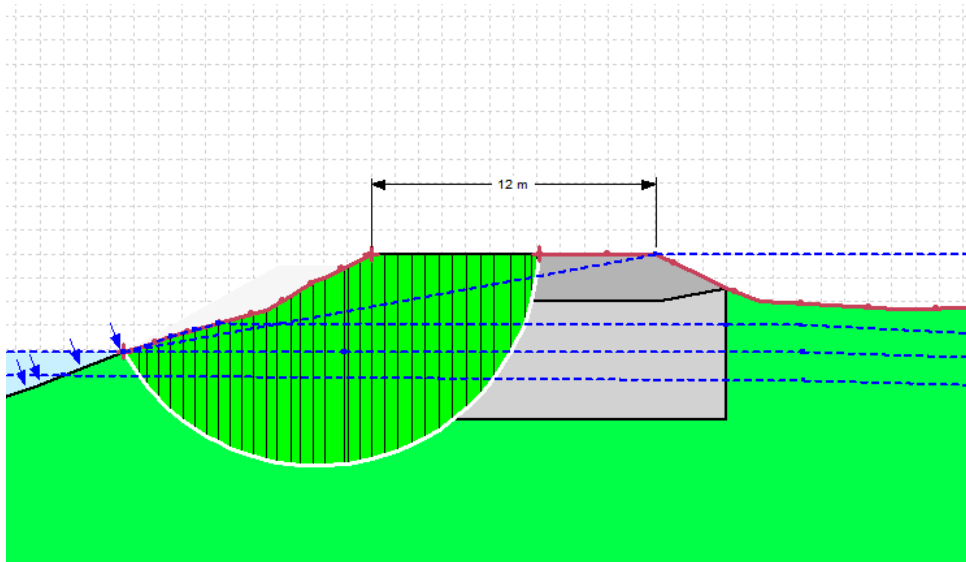
Figur C.1: Kritisk glidyta för hela område utan tryckbank



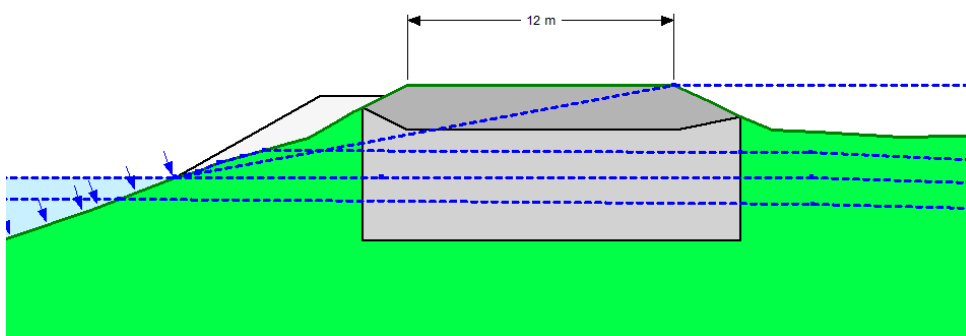
Figur C.2: Kritisk glidyta för hela område med tryckbank



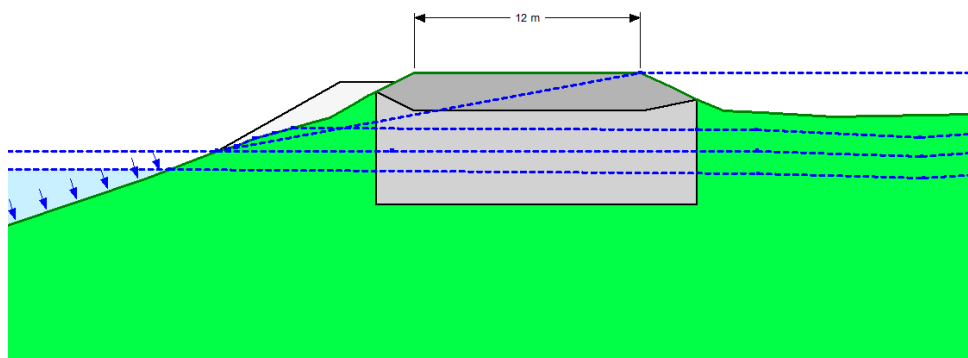
Figur C.3: Kritisk glidyta enbart bank med tryckbank



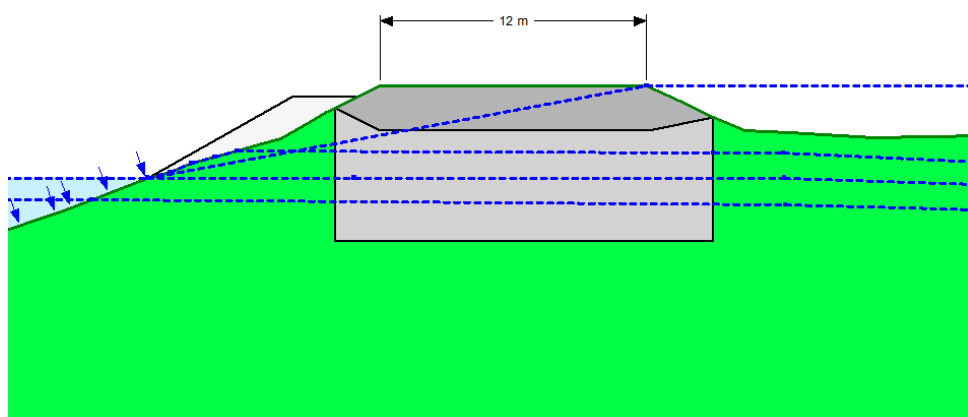
Figur C.4: Kritisk glidyta enbart bank utan tryckbank



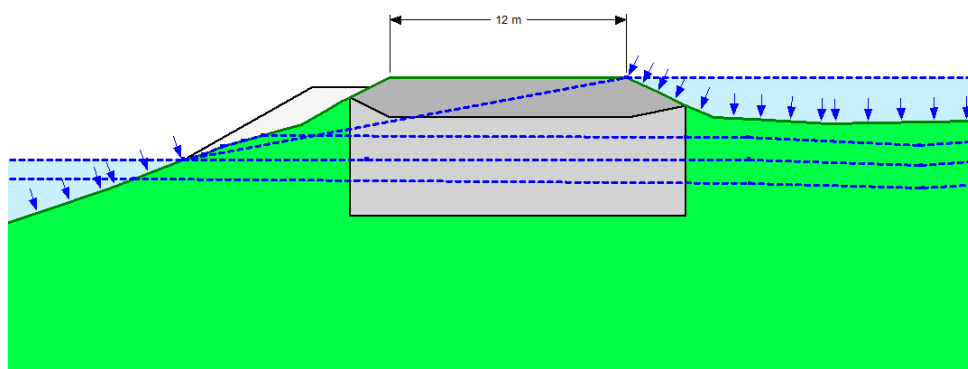
Figur C.5: Grundscenario med normal sjö- och grundvattennivå (a)



Figur C.6: Scenario med låg sjö- och grundvattennivå (b)



Figur C.7: Scenario med hög grundvattennivå (c)



Figur C.8: Scenario med översvämning mot bank (d)

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige

www.chalmers.se



CHALMERS