

Pålbarhet i blockig mark

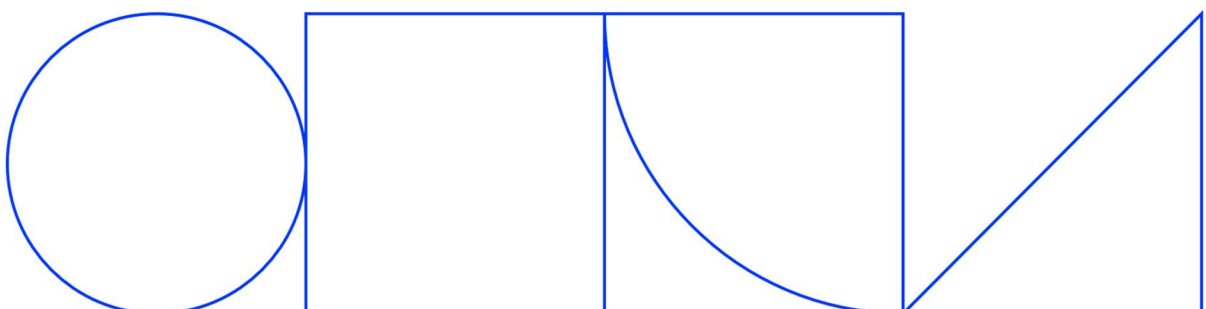
Etapp 1: Sannolikhetsbaserad modellering av pålbortslagning

Chiara Cannizzaro
KTH

Anders Beijer-Lundberg
ELU Konsult / KTH

Stefan Larsson & Johan Spross
KTH

2025-07-25



Förord

Denna SBUF-rapport är en populärvetenskaplig sammanfattning av en licentiatuppsats som publicerats på KTH. Forskningsprojektet har undersökt hur pålbarheten i blockig mark kan bedömas på ett objektivare sätt än med befintliga metoder (t.ex. Pålkommisionens rapport 103).

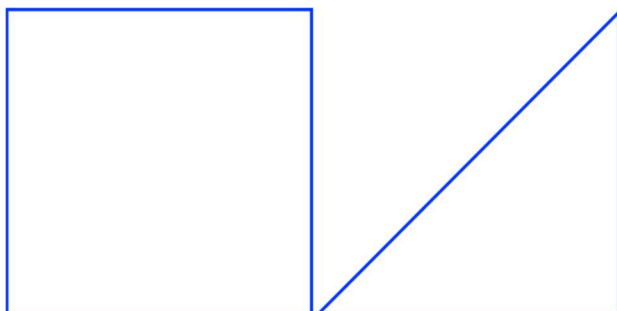
Forskningen har i huvudsak utförts av doktoranden Chiara Cannizzaro på KTH:s avdelning för jord- och bergmekanik under 2022-2025, med stöd av handledarna Johan Spross (KTH), Anders Beijer Lundberg (ELU/KTH) och Stefan Larsson (KTH).

Forskningsresultaten har redovisats i fyra vetenskapliga publikationer:

- Artikel A.** Cannizzaro, C., M. Alinejad, A. Beijer-Lundberg, S. Larsson and J. Spross (2023). Effect of uncertainty in design decisions for driven piles in soil with high boulder content. I: Geo-Risk 2023, ASCE Geotechnical Special Publications (GSP) 347, 268-276.
- Artikel B.** Cannizzaro, C., A. Beijer-Lundberg, S. Larsson and J. Spross (2024). On the probability of boulder encounter for piles driven in glacial till. I: 7th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization (ISC2024), Barcelona, Spain, 1746-1753.
- Artikel C.** Cannizzaro, C., A. Beijer-Lundberg, S. Larsson and J. Spross (2025). Risk-based approach for modelling premature pile refusal in glacial till. Under granskning i internationell tidskrift.
- Licentiatuppsats.** Cannizzaro, C. (2025). Pile driving in glacial soil: Stochastic modelling of boulder-induced premature refusal. TRITA-ABE-DLT 2510. KTH, Stockholm.

Tack riktas till SBUF, Trafikverket (BIG) och KTH, som gemensamt finansierat projektet, samt till ELU konsult som bidragit med praktikfall som studerats. Tack riktas även till PEAB Anläggning, särskilt till Nils Rydén och Martin Laninge, som bidragit med ett entreprenörsperspektiv. Projektet stöttades även med en referensgrupp som i flera möten bidrog till projektets framdrift. Referensgruppen bestod av Kenneth Viking, Trafikverket; Olle Båtelsson, Trafikverket; Michael Sabattini, PEAB; Thomas Torefeldt, Veidekke; Maedeh Alinejad, Geomind; Peter Alheid, Hercules; Nadia Larsson, ELU Konsult; Leif Jendeby, COWI; Moa Asplind, Skanska; Johan Olovsson, Besab; Gunnar Holmberg, Skanska; Per Hedman, Tyréns; Olle Kwick, Geoteknologi; Erik Westerberg, Sitowise.

Stockholm, juli 2025



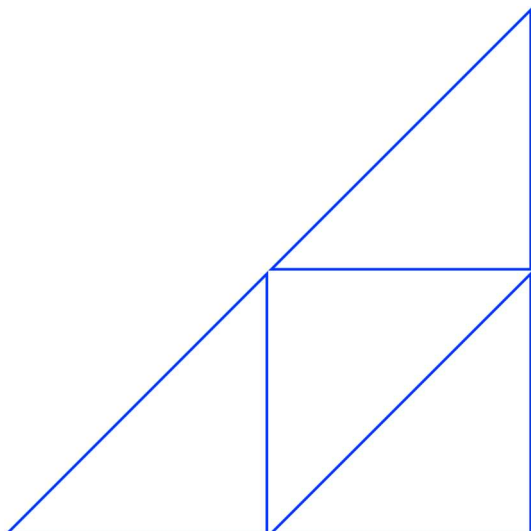
Sammanfattning

Den mest effektiva installationsmetoden för pålar är att slå ner dem i marken med en hejare, och den mest ekonomiska och klimatvänliga typen av pålar är betongpålar. Förekomst av block i marken kan dock skada pålen vid installationen, vilket leder till så kallad bortslagning av påle. Det råder dock normalt stora osäkerheter kring blockens rumsliga fördelning, deras geometriska och mekaniska egenskaper, variationen i jordlagertjocklek och den dynamiska samverkan som uppkommer mellan påle och block i fast jord, vilket gör det svårt att förutspå hur många pålar som kan komma att slås bort. Att inte korrekt kvantifiera risken för bortslagning kan leda till betydande kostnadsökningar, förseningar i projektet och ineffektiv resursanvändning ur miljösynpunkt, samt tvister mellan beställare och entreprenör.

De metoder för bedömning av risken för pålbortslagning som idag står till buds är otydliga och till största delen deterministiska och erfarenhetsbaserade.

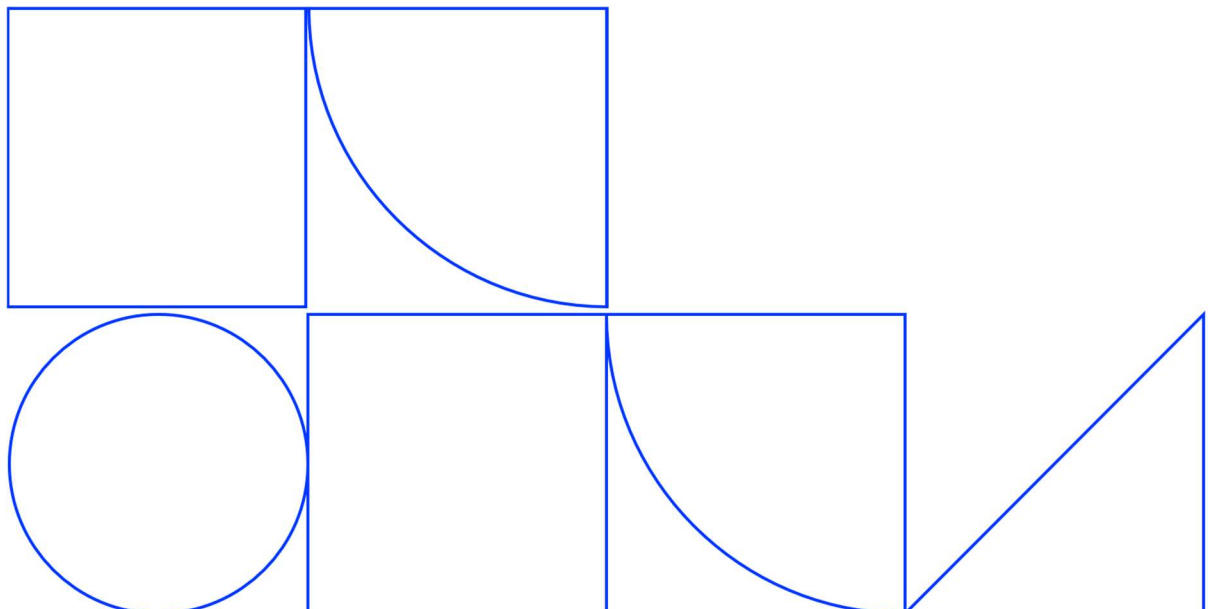
Byggbranschen – särskilt i Sverige, där stora delar av landskapet är täckt av den ofta blockiga jordarten morän – skulle därför ha stor nytta av en riskbaserad metod som identifierar och modellerar de viktigaste osäkerhetskällorna på ett kvantifierbart och systematiskt sätt, men som samtidigt är intuitiv, praktisk och lätt att tillämpa. Ett sådant angreppssätt är särskilt avgörande i projekteringsskedet, för att välja lämplig påltyp och installationsmetod utifrån specifika markförhållanden – i syfte att möjliggöra mer ekonomiska och hållbara pålningslösningar.

Denna SBUF-rapport sammanfattar resultatet av ett licentiatprojekt på KTH. Projektet har utvecklat en sådan systematisk metod för att kvantifiera den ekonomiska risken kopplad till bortslagning av pålar i morän. Arbetet omfattar bl.a. utvecklingen av en sannolikhetsbaserad pålbarhetsmodell, baserad på en endimensionell Poisson-process, som modellerar den stokastiska förekomsten av block och variationen i jordlagrets mäktighet. En enkel kostnadsmodell som identifierar och kvantifierar de viktigaste ekonomiska konsekvenserna av bortslagning har också utvecklats. Användning av pålbarhetsmodellen ökar medvetenheten om vilka osäkerheter som påverkar pålningen, vilket gör det enklare att fatta riskmedvetna beslut.



Innehåll

1. Inledning	1
1.1 Syfte	1
1.2 Omfattning	1
1.3 Avgränsningar	2
2. Kort litteraturgenomgång och bakgrund	3
3. Utveckling av en riskbaserad pålbarhetsmodell	4
3.1 Modellering av blockförekomst	4
3.2 Modellering av pålens känslighet för block	5
3.3 Sannolikheten för bortslagning	6
3.4 Kostnadsmodell för bortslagning	6
4. Exempel på beräkningsresultat	6
5. Slutsatser och fortsatt forskning	8
Referenser	9



1. Inledning

Pålgrundläggning innebär att man fördelar laster från en överbyggnad till djupare och fastare jordlager eller till berg. Den mest effektiva installationsmetoden är att slå ned pålar i marken med hjälp av en hejare. Slagna pålar är oftast betong- eller stålrörspålar, där betongpålar i de flesta fall är den både mest kostnadseffektiva och resurseffektiva typen av pålar. Förekomst av hinder i jorden kan dock försvåra installationen av slagna pålar. Ett naturligt hinder i glaciala jordar är block, vilka bildats genom glacial erosion. Den slumpmässiga förekomsten av block i marken kan skada pålen vid installationen, vilket leder till så kallad bortslagning av påle.

Stora osäkerheter kring blockens rumsliga fördelning, deras geometriska och mekaniska egenskaper, variationen i jordlagertjocklek och den dynamiska samverkan mellan påle och block i fast jord, bidrar till att försvåra problemet ytterligare. Att inte korrekt kunna kvantifiera risken för bortslagning kan leda till betydande kostnadsökningar, förseningar i projektet och ineffektiv resursanvändning ur miljösynpunkt, samt till tvister mellan beställare och entreprenör.

De bedömningsmetoder för pålbortslagning som idag står till buds för är otydliga och till största delen deterministiska och erfarenhetsbaserade. Byggbranschen – särskilt i Sverige, där stora delar av landskapet är täckt av den glaciala jordarten morän – skulle därför ha stor nytta av en riskbaserad metod som identifierar och modellerar de viktigaste osäkerhetskällorna på ett noggrant och systematiskt sätt, men som samtidigt är intuitiv, praktisk och lätt att tillämpa. Ett sådant angreppssätt är särskilt avgörande i projekteringsskedet, för att välja lämplig påltyp och installationsmetod utifrån specifika jordförhållanden. Det möjliggör mer ekonomiska och hållbara pålningslösningar.

1.1 Syfte

Syftet med detta forskningsprojekt var att presentera en systematisk metod för att analysera och kvantifiera risken för att pålar stöter på hinder och slås bort vid installation i blockig mark. Det specifika målet var att ta fram ett tillförlitligt verktyg som också är praktiskt användbart i geoteknikerns vardag. Verktöget ska hjälpa geoteknikern att hitta en bättre balans mellan kostnad, byggtid och miljöhänsyn vid dimensionering av pålar – samtidigt som det ger ett strukturerat sätt att hantera problemet med bortslagning av pålar.

1.2 Omfattning

Forskningsaktiviteterna i projektet omfattade följande:

- En genomgång av aktuellt forskningsläge och befintliga angreppssätt för problemet med pålbortslagning inom byggbranschen internationellt, där olika metoders fördelar och nackdelar jämfördes. Särskilt fokus lades på hur dessa skulle kunna användas i svensk kontext utifrån vanligt förekommande jordlagerföljder.

- Utveckling av en endimensionell pålbarhetsmodell för det komplexa system som uppstår vid pålningsarbeten i blockrik jord. Detta inkluderade en sannolikhetsbaserad modell för att beskriva förekomsten av block och variationen i jordlagrens mäktighet.
- Framtagande av ett simuleringsverktyg baserat på Monte Carlo-metoden för att implementera sannolikhetsmodellen i praktiska beräkningar.
- Utveckling av en kostnadsmodell för att kvantifiera de viktigaste ekonomiska konsekvenserna av bortslagning, vilket gör det möjligt att jämföra olika pålningsalternativ på ett systematiskt sätt.
- Praktiska beräkningsexempel som visar hur metoden kan användas i realistiska scenarier.

1.3 Avgränsningar

Projektet undersöker problemet med pålbortslagning i svenska glaciala jordar som innehåller block, företrädesvis morän. Studien är begränsad till typiska påltyper som vanligen används i svenska byggprojekt, d.v.s. slagna betongpålar, slagna stålplålar och borrade stålplålar (Figur 1). Fokus ligger på blockförekomst i moränlagret, och eventuella block som kan förekomma i andra jordarter – såsom lera eller fyllnadsmaterial – beaktas inte.

Andra möjliga orsaker till strukturella skador på pålen, exempelvis fel på slagningsutrustningen, transportskador, mänskliga fel eller bristande erfarenhet hos arbetslaget, tas inte upp i denna studie. Bortslagning av pålar antas i den utvecklade modellen enbart bero på den slumpmässiga förekomsten av block i moränlagret och samspelet mellan blocken och pålen.

Undersökningsmetoden jord-bergsondering lyfts fram som den viktigaste källan till information om blockförekomst, eftersom den används i stor utsträckning i Sverige – särskilt vid byggprojekt för bostäder och kommersiella fastigheter. Möjliga informationskällor från seismiska eller andra geofysiska undersökningsmetoder behandlas inte.



Figur 1. a) Slagning av betongpålar, b) Slagning av stålplålar, c) Installation av borrade stålplålar. (Foto: Anders Beijer-Lundberg)

2. Kort litteraturgenomgång och bakgrund

I skandinavisk pålgrundläggning på land är det vanligt att slå ned ett större antal pålar med liten diameter, jämfört med internationella offshore-projekt där man i regel använder ett mindre antal pålar med stor diameter. För svenska förhållanden innebär detta i praktiken att det ofta kan förväntas att några pålar slås bort under installationen – det vill säga att de inte går att slå till avsett djup på grund av hinder i marken. Den verkliga utmaningen ligger dock i att förutse andelen bortslagning med tillräcklig noggrannhet under projekteringen, dels för att rekommendera pålningsmetod och dels för att föreslå åtgärder.

Forskningen om pålbarhet i blockig mark är begränsad till ett fåtal studier. Där kan nämnas en studie av Magnusson m.fl. (1994) om hur pålbarheten kan bedömas baserat på resultatet av hejarsondering. Syftet var att utnyttja all tillgänglig information från sonderingarna för att optimera designen och minska risken att underskatta pålarnas erforderliga längd. Studien visade att det finns ett samband mellan hejarsonderingsresultaten och fullskaliga påslagningstester, med en platsspecifik skalfaktor på cirka 30. Detta kunde användas för att uppskatta det energibehov som krävs vid installation, vilket i sin tur kunde vägleda val av både pålens dimensioner och slagningsutrustning. Det ska dock understrykas att studie inte behandlade de pålbarhetsproblem som kan uppstå vid blockförekomst.

Ett enklare sätt att bedöma risken att stöta på block har föreslagits av Pålkommisionen (2007). Där används resultat från jord-bergsondering för att skatta blocktätheten i jorden, det vill säga hur många block som påträffas per meter penetrerad jord. Utifrån detta bedöms sedan sannolikheten att stöta på block, baserat på antalet påträffade block per sonderingspunkt. En mer detaljerad beskrivning av denna metod finns i Artikel A (Cannizzaro et al. 2023). Dock ger detta enbart en kvalitativ klassning av blockförekomsten – någon kvantitativ tolkning av osäkerheten med i termer av sannolikheter eller sannolikhetsfördelningar ges inte.

Ett mer probabilistiskt angreppssätt föreslogs nyligen av Alinejad och Lundberg (2024). Med deras simuleringsmetod genereras slumpmässigt placerade block i ett jordlager med hjälp av en så kallad framåtsimulering. Därefter genomförs en bakåtsimulering av en tänkt markundersökning, för att kunna koppla resultaten från undersökningen till ett mått på volymetrisk blockinnehåll i en given jordvolym. Denna probabilistiska analys förväntas kunna ge vägledning om hur omfattande undersökningar med den redovisade jord-bergsonderingsmetoden som krävs för att på ett tillförlitligt sätt kunna skatta blockförekomsten.

Sammantaget visar litteraturstudien att det saknas en praktisk metod som på ett smidigt sätt beaktar samspelet mellan påle och block, och samtidigt presenterar osäkerheterna i ett användarvänligt format. Vad som verkligen behövs är ett arbetssätt som ger en fördjupad förståelse av de stokastiska mekanismerna bakom pålbortslagning, möjliggör test av olika osäkerhetskällor, men ändå är tillräckligt enkelt och exakt för att kunna tillämpas i praktiken vid riskbedömning. Ett sådant arbetssätt utvecklas i föreliggande rapport. En mer omfattande genomgång av forskningslitteraturen ges i Cannizzaros (2025) licentiatuppsats.

3. Utveckling av en riskbaserad påbarhetsmodell

Vid formuleringen av problemet identifieras förekomsten av block i moränlagret som den huvudsakliga osäkerheten som påverkar påbarheten. Denna osäkerhet beror både på jordens naturliga variation och på begränsad kunskap om antalet block i jorden. Problemet som sådant betraktas principiellt som en betingad sannolikhet, där man söker sannolikheten för att en påle ska slås bort för en viss vald design (d.v.s. typ av påle och installationsmetod):

$$\begin{aligned} P(\text{bortslagen påle med design } D) &= \\ &= P(\text{bortslagen påle med design } D \mid \text{block påträffat}) \times P(\text{block påträffat}) \end{aligned} \quad (1)$$

Därmed behöver två aspekter modelleras: dels sannolikheten $P(\text{block påträffat})$ vilken avser att en påle träffar på ett block vid nedslagningen, dels den betingade sannolikheten $P(\text{bortslagen påle med design } D \mid \text{block påträffat})$, som avser att det påträffade blocket verkligen leder till en bortslagen påle för den aktuella pålningsmetoden. Denna betingade sannolikhet påverkas exempelvis av samspelet mellan jordlagrets fasthet och den valda pålens styvhet, samt även blockets storlek.

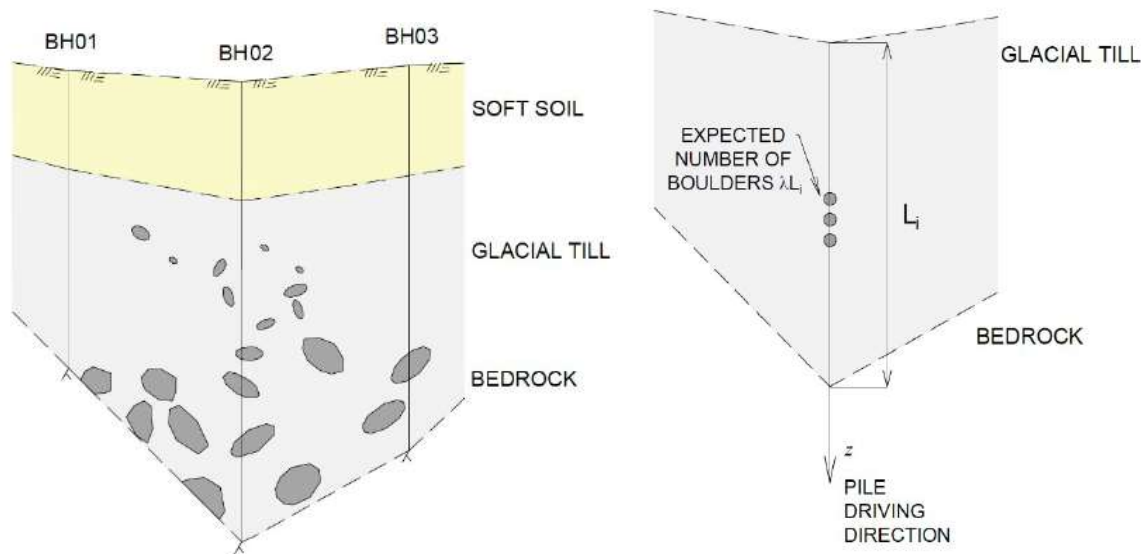
Om man kombinerar en beräkning av sannolikheten för bortslagning av påle med en bedömning av den ekonomiska konsekvensen för projektet när detta sker, kan den ekonomiska risken kopplad till påbarheten analyseras för olika pålgrundläggningsalternativ. Därmed kan användaren av modellen göra en bedömning av den ekonomiska risken som tas vid olika val påltyp och installationsmetod. Exempelvis kan man med modellen beräkna sannolikheten för att slagna betongpålar ändå ska löna sig i jämförelse med borrarade stålspålar, även om det finns en icke försumbar sannolikhet att ett större antal pålar kommer att slås bort p.g.a. block i marken.

3.1 Sannolikhetsbaserad modellering av blockförekomst

Blockförekomsten modelleras här som en oönskad händelse som följer en endimensionell homogen Poisson-process (Figur 2). Detta är rimligt i svensk kontext där pålarnas diameter ofta är under 300 mm, medan pållängden kan vara 10–30 m, och blocken sällan är så stora att samma block påverkar mer än en påle samtidigt. Med denna modell blir sannolikheten för att en slagen påle stöter på k antal block i ett jordlager med tjocklek L :

$$P(k, \lambda L) = \frac{(\lambda L)^k}{k!} e^{-\lambda L} \quad (2)$$

Parametern λ definieras som det genomsnittliga antalet block per enhetslängd längs pålen i jordlagret. Denna frekvens beskriver osäkerheten kopplad till blockens slumpmässiga fördelning inom det blockiga jordlagret. Parametern λ kan enkelt skattas från resultat av jord-bergsondering och metoden är därför en utveckling av metodiken som föreslås av Pålkommisionen (2007).



Figur 2. Vänster: Schematisk illustration av blockigt jordlager. Höger: Endimensionell Poisson-modell som beskriver sannolikheten att påträffa block vid pålning i det blockiga jordlagret.

Antagandena för att använda en homogen Poisson-process för att modellera förekomsten av block i ett jordlager med enhetlig tjocklek L diskuteras i detalj i Artikel B (Cannizzaro et al. 2024). En sammanfattning ges nedan:

- Block antas slumpmässigt kunna förekomma på vilken nivå som helst inom det blockiga jordlagret.
- Blockförekomsten är statistiskt oberoende: att ett block finns vid en viss nivå innebär i modellen inte en ökad sannolikhet för ytterligare block i närheten. Denna förenkling innebär att modellen dock inte beaktar eventuella kluster av block.
- Eftersom blockens storlek inte explicit modelleras kan block i modellen förekomma tätare än vad som är realistiskt med hänsyn till verkliga blockstorlekar. Detta kan teoretiskt överskatta antalet påträffade block vid mycket blockrik jord.

Eftersom mer än ett block kan finnas i pålens väg behöver man beskriva sannolikheten för att olika antal block påträffas under installationen, d.v.s. en beräkning av sannolikheten för att träffa på $k = 0, 1, 2, \dots, k_{\max}$ antal block, givet att blockförekomsten modelleras med en Poisson-fördelning. Fördelningen för sannolikheten för olika k blir en så kallad kategoriell fördelning.

3.2 Modellering av pålens känslighet för block

Slutligen beaktas den betingade sannolikheten $P(\text{bortslagen påle med design } D \mid \text{block påträffat})$. Eftersom detta avser ett mycket komplext beteende, är det svårt att modellera detta med analytiska eller numeriska modeller. Vi föreslår därför att en empirisk blockkänslighetskoefficient, kallad r_D , införs. Denna koefficient tar ett värde mellan 0 och 1 beaktar pålens benägenhet att slås bort ifall den träffar ett block, där $r_D = 0$ innebär att pålbarheten i design D inte alls påverkas av blockighet (vilket

exempelvis kan antas för borrarade stålplåtar), medan $r_D = 1$ innebär att ett påträffat block alltid leder till att pålen slås bort, oavsett markförhållanden. Eftersom slagna betongplåtar är känsligare för block än slagna stålplåtar förväntas r_D ta ett lägre värde för slagna betongplåtar än för slagna stålplåtar. Kalibrering av r_D för olika påltyper i olika jordar bör relativt enkelt kunna utföras baserat på data från utförda pålningsprojekt, men det har inte ingått i föreliggande forskningsprojekt.

3.3 Sannolikheten för bortslagning

När blockförekomsten respektive pålens känslighet för block har modellerats enligt föregående två avsnitt, kan dessa två komponenter gemensamt beaktas enligt ekvation (1). Detta ger sannolikheten för bortslagning, givet en viss vald design:

$$P(\text{bortslagen påle med design } D) = \sum_{k=1}^{k_{\max}} [1 - (1 - r_D)^k] \frac{\lambda L^k}{k!} e^{-\lambda L} \quad (3)$$

där faktorn $[1 - (1 - r_D)^k]$ beskriver sannolikheten för att framgångsrikt passera samtliga k antal block som fanns i pålens väg. I Artikel C (Cannizzaro et al. 2025) presenteras en algoritm för hur ekvation (3) kan beräknas numeriskt genom en Monte Carlo-simulering.

3.4 Kostnadsmodell för bortslagning

I Artikel C (Cannizzaro et al. 2025) presenteras också en modell för att skatta de kostnader som uppstår i ett projekt när en påle slås bort. Kostnadsmodellen beaktar dels ursprungliga kostnader för de planerade pålarna, dels den extra materialkostnaden för att slå en ny påle av samma längd som den som slogs bort, dels dess installationskostnad. Modellen bygger på ett antagande om att varje bortslagen påle ersätts med en ny påle av samma typ, tills det behövda antalet pålar installerats. Även om det förmodligen inte är ett realistiskt beteende att fortsätta med samma påltyp och installationsmetod om väldigt många pålar slås bort, så behövs ett sådant antagande för att göra konsekventa jämförelser av olika designalternativ.

4. Exempel på beräkningsresultat

I Artikel C ges ett omfattande beräkningsexempel, som sammanfattas här. Den ekonomiska risken förknippad pålbarheten för tre olika designalternativ analyserades: (1) slagna betongplåtar, (2) slagna stålplåtar och (3) borrarade stålplåtar. Antagandena för respektive alternativ framgår i Tabell 1, där de fördelningen mellan faktorerna kan anses representativa, även om de absoluta talen påverkas av kostnadsindex och andra faktorer.

Jord-bergsonderingar på platsen detekterade 20 stycken block på en total sonderingslängd av 270 m borrhål i ett blockigt lager av morän. Detta ger $\lambda = 20 / 270 = 0,07$. Moränlagrets tjocklek L varierade mellan 0–30 m, vilket kunde beskrivas med en lognormalfördelning.

Tabell 1. Analyserade designalternativ.

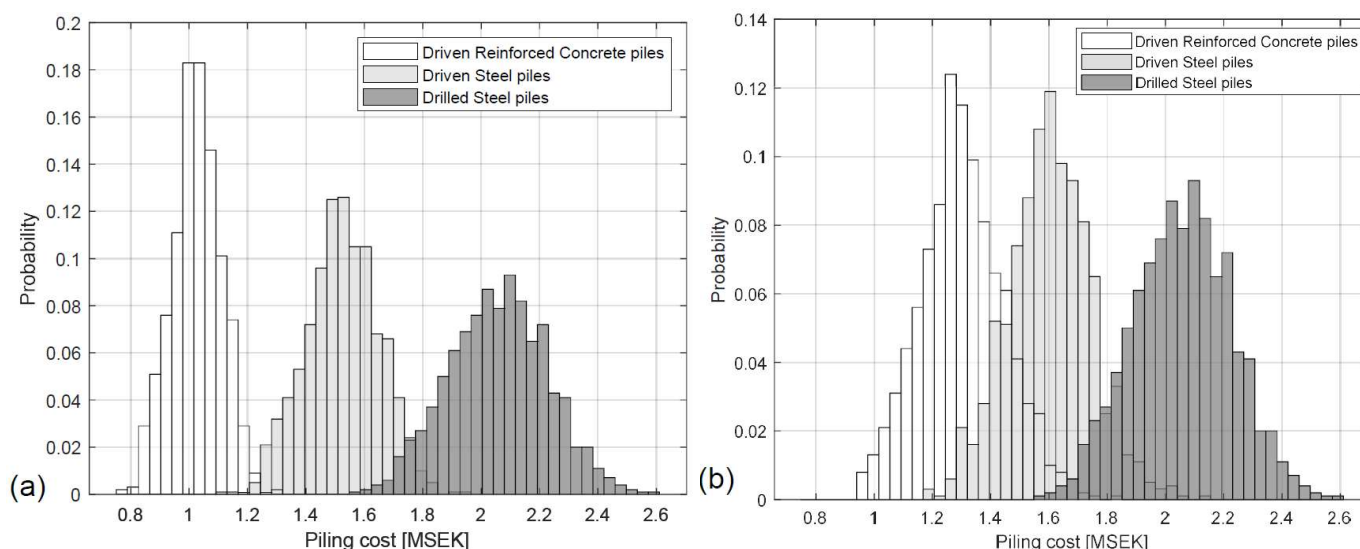
Design-alternativ	Antal pålar, n	Känslighet för block, r_b	Material-kostnad ¹ (per meter)	Material-kostnad ² (per påle)	Installations-kostnad (per meter)
1. Slagna betongpålar	100	0,5	350 kr/m	500 kr/påle	1000 kr/m
2. Slagna stålplålar	100	0,1	500 kr/m	800 kr/påle	1500 kr/m
3. Borrade stålplålar	80	0	500 kr/m	4000 kr/påle	2500 kr/m

¹ Materialkostnad *per meter* avser kostnader som påverkas av pålens längd

² Materialkostnad *per påle* avser kostnader som är konstanta per påle oavsett längd.

Monte Carlo-simuleringen av pålbarheten gav resultatet att av 100 planerade pålar förväntas i genomsnitt 27 betongpålar slås bort, att jämföra med enbart 5 stålplålar. Det finns dock en stor osäkerhet som modellen låter oss kvantifiera: antalet bortslagna betongpålar kan i detta fall hamna någonstans i spannet omkring 15–45 stycken och stålplålar i spannet omkring 0–10 stycken.

Trots det relativt stora antalet bortslagna betongpålar indikerar kostnadsmodellen att slagna betongpålar är det bästa designalternativet i detta fall. Det går att beräkna sannolikheten att slagna eller borrade stålplålar skulle bli ett billigare alternativ. I just detta fall är denna sannolikhet mycket liten, i storleksordningen 0,1%, även efter att tilläggs-kostnaderna för att ersätta de bortslagna betongpålarna beaktats. Detta illustreras i Figur 3, som jämför variationen i kostnad med och utan pålbortslagning i beaktande. Notera att fördelningarna för de tre designalternativen är korrelerade på grund av att en del av osäkerheten i totalkostnaden beror på osäkerheten i det blockiga jordlagrets tjocklek. Överlappet mellan fördelningarna ser därför större ut än vad det egentligen är; bortslagna pålar utgör enbart en del av kostnadsvariationen.



Figur 3. a) Variation i initial material- och installationskostnad utan att beakta bortslagning. b) Variation i total material- och installationskostnad med beaktande av bortslagning.

Vi har också undersökt hur pålbarhetsmodellen beter sig i fall av mer och mindre blockighet. Beräkningsresultaten är påtagligt känsliga för ändringar i blockighetsparametern λ . Även blockkänslighetskoefficienten r_D har stor påverkan på den beräknade totalkostnaden. Detta diskuteras i detalj i Artikel C (Cannizzaro et al. 2025).

I Cannizzaros (2025) licentiatuppsats diskuteras även pålbarhetsmodellens antaganden och modellosäkerheter, exempelvis eventuell effekt av blockens storlek och orientering, liksom möjligheten för pålen att tränga förbi mindre block utan att skadas. Det konstateras att den empiriska blockkänslighetskoefficienten r_D är viktig att kalibrera korrekt. Vidare diskuteras vilken roll en riskbaserad pålbarhetsmodell kan ha i svensk byggindustri, inklusive hur modellen kan användas tillsammans med andra verktyg såsom resultat av provpålning.

5. Slutsatser och fortsatt forskning

Detta är en sammanfattning av de viktigaste slutsatserna som kan dras från detta forskningsprojekt:

- Den föreslagna riskbaserade pålbarhetsmodellen gör det möjligt att på ett systematiskt sätt beskriva hur block slumpmässigt kan vara fördelade i jordlager med varierande tjocklek. Modellen är tydligt förankrad i sannolikhetslära och gör det möjligt att objektivt kvantifiera sannolikheten för att en påle slås bort, vilket är ett stort framsteg jämfört med dagens mer empiriska tillvägagångssätt (Pålkommissionens rapport 103, 2007), där sådan sannolikhet enbart klassificeras i vaga termer såsom "medelstor blockrisk" direkt baserat på antalet observerade block i borrhål.
- Pålbarhetsmodellen bygger på ett antagande om att antalet block som en påle påträffar under installationen kan beskrivas med en endimensionell homogen Poisson-process. Indatan till modellen kan enkelt utvärderas från jordbergsonderingar.
- Pålbarhetsmodellen skattar sannolikheten för att en påle slås bort och den kan hantera både varierande jorddjup och flera påträffade block för en enskild påle. Genom att en kostnadsmodell kopplas till pålbarhetsmodellen kan den ekonomiska risken kvantifieras, vilket ger ett tydligt beslutsunderlag när man väljer mellan olika designvarianter (påltyp och installationsmetod). Användning av modellen ökar också medvetenheten om vilka felkällor och osäkerheter som påverkar pålningen, vilket gör det enklare att fatta riskmedvetna beslut.

Forskningsprojektet har i första hand analyserat den ekonomiska risken vid bortslagning av pålar i termer av kostnader för pålar enligt Tabell 1. För framtida forskning föreslås:

- Osäkerheter kopplade till blockens geometri, hållfasthet och excentricitet när pålen träffar blocket behöver studeras närmare för att förbättra modellens noggrannhet.

- Andra geotekniska undersökningsmetoder än jord-bergsondering skulle kunna bidra till att bedöma blockigheten i marken. Även vissa geofysiska metoder kan vara relevanta. I så fall behöver metoder utvecklas så att information från flera olika undersökningsmetoder kan vägas samman till en utsaga om blockigheten.
- Utöver kostnader kan även andra konsekvenser av pålbortslagning såsom försening och klimatpåverkan (t.ex. koldioxidutsläpp) kvantifieras för olika scenarier.
- En mer heltäckande riskvärderingsmetod kan utvecklas, där kostnad, tid och miljöpåverkan kan beaktas i en strukturerad beslutsprocess vid projektering av pålning.
- En riskbaserad pålbarhetsmodell kan även ligga till grund för att uppnå en mer rättvis och kalkylerbar fördelning av kontraktsrisker mellan beställare och entreprenör. Detta skulle förbättra både kontrakten i sig och även möjligheterna till en enklare lösning av tvister.

Referenser

- Alinejad, M. & Lundberg, A. (2023) Assessment of boulder content by stochastic modelling and inverse analysis. I: Proceedings of the 10th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering, 26-28 juni 2023, London.
<https://doi.org/10.53243/NUMGE2023-73>
- Cannizzaro, C., M. Alinejad, A. Beijer-Lundberg, S. Larsson and J. Spross (2023). Effect of uncertainty in design decisions for driven piles in soil with high boulder content. I: Geo-Risk 2023, ASCE Geotechnical Special Publications (GSP) 347, 268-276.
- Cannizzaro, C., A. Beijer-Lundberg, S. Larsson and J. Spross (2024). On the probability of boulder encounter for piles driven in glacial till. I: 7th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization (ISC2024), Barcelona, Spain, 1746-1753.
- Cannizzaro, C., A. Beijer-Lundberg, S. Larsson and J. Spross (2025). Risk-based approach for modelling premature pile refusal in glacial till. Under granskning i internationell tidskrift.
- Cannizzaro, C. (2025). Pile driving in glacial soil: Stochastic modelling of boulder-induced premature refusal. TRITA-ABE-DLT 2510. KTH, Stockholm.
- Magnusson, O., G. Holm, H. Andersson & B. Åstedt (1994). Pålbarhet baserad på sonderingsresultat. Luleå, Luleå tekniska universitet.
- Pålkommisionen (2007). Slagna friktionspålar. Rapport 103. Linköping.